

# FASCÍCULO 6. Saneamiento y tecnologías

**Coordinación:**

Carlos Alberto Ávila Orta

Cintha Valeska Castro Pérez

César Casiano Flores



# **LA CRISIS DEL AGUA EN EL SIGLO XXI: PERSPECTIVAS Y SOLUCIONES**

## **DIRECTORIO**

### **EL COLEGIO DE TLAXCALA, A. C.**

Dr. Serafín Ríos Elorza

**Presidente**

Dr. Wilfrido Gutiérrez Ortiz

**Secretario Técnico**

Dra. Adriana Montserrat Pérez Serrano

**Directora Académica**

Dra. Ivonne Virginia Campos Rico

**Secretaria de Investigación**

Lic. Mayra Vazquez Velazquez

**Director Administrativo**

Lic. Karen Janeth Tirado Portilla

**Coordinadora de Comunicación Social**

Mtro. Arturo Juárez Martínez

**Coordinador Editorial**

# LA CRISIS DEL AGUA EN EL SIGLO XXI: PERSPECTIVAS Y SOLUCIONES

María de Lourdes Hernández Rodríguez  
Ignacio Ocampo Fletes  
Ángel David Flores Domínguez

*Coordinadores generales*



Primera edición: Julio 2024

®El Colegio de Tlaxcala, A. C.

El Colegio de Tlaxcala, A. C.

Melchor Ocampo No. 28

C.P. 90600, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala

Tel.: (01 246) 46 4 58 74, 46 4 77 25, 46 4 77 26 Ext. 202

Correo electrónico: [elcolegiodetlaxcala@coltlax.edu.mx](mailto:elcolegiodetlaxcala@coltlax.edu.mx)

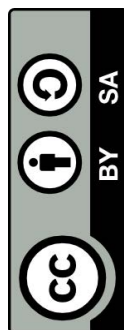
Diseño de interiores: Rafael Cruz Sánchez

Diseño de forros: Alejandro Ángel López Abriz

Todas las personas que participaron en este libro revisaron y aprobaron la versión final de su contribución para su publicación y difusión.

Las opiniones expresadas en las contribuciones de este texto corresponden exclusivamente a sus autores y no reflejan necesariamente las de El Colegio de Tlaxcala, A. C.

ISBN: 978-607-7673-98-9



¡Copia este libro!

Este libro se publica bajo una licencia CC BY-SA, lo cual significa que usted puede copiarlo, redistribuirlo, remezclarlo, transformarlo y construir sobre su contenido para cualquier propósito, incluso comercial, mientras dé el crédito apropiado, provea un enlace a la licencia, e indique si se realizaron cambios.

Si remezcla, transforma, o construye sobre el material, debe distribuir sus contribuciones bajo el mismo licenciamiento que el material original.

Detalles de licenciamiento:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Compartir no es delito.

**FASCÍCULO 6**  
**SANEAMIENTO Y TECNOLOGÍAS**

Carlos Alberto Ávila Orta  
Cinthya Valeska Castro Pérez  
César Casiano Flores

*Coordinadores*

# Índice

<b>Presentación</b>	8
Carlos Alberto Ávila Orta	
Cinthya Valeska Castro Pérez	
César Casiano Flores	
<b>La cuenca del río Conchos bajo un alarmante estrés hídrico</b>	12
Salvador Peña Díaz	
<b>Caracterización de la sequía meteorológica en la cuenca Cálico, Departamento de Matagalpa, Nicaragua</b>	26
Harvin Joel Bonilla Escoto	
<b>Aportación para el ODS 6: Desarrollo de sistemas para el saneamiento y reúso de aguas residuales domesticas mediante humedales construidos en zonas rurales en el occidente de México</b>	39
Aldo Antonio Castañeda Villanueva	
<b>Gestión de recarga de acuíferos (mar) vs desalinización; la búsqueda de alternativas sostenibles. Caso de estudio Baja California Sur, México</b>	54
Miguel Angel Imaz-Lamadrid	
Jobst Wurl	
María Z. Flores-López	
Pablo Hernández-Morales	

<b>Spatiotemporal data for managing domestic wastewater</b>	68
Néstor DelaPaz-Ruíz	
<b>A governance analysis of the role of artificial intelligence in the European water sector</b>	80
César Casiano Flores	
A. Paula Rodriguez Müller	
<b>Uso indiscriminado del recurso hídrico por el sector agrícola y afectación en el abastecimiento urbano (Cd. Jiménez, Chihuahua)</b>	95
María de Lourdes Ballinas Casarrubias	
María del Carmen González Horta	
María del Rocío Infante Ramírez	
Margarita Sofía García Madrid	
<b>Perspectivas sociales de la calidad del agua en Zimapán-Hidalgo</b>	105
Mónica Nayeli Velasco-Estudillo	
Jaqueline Reséndiz	
Leydi Diana Morales Díaz	
<b>Monitoreo de la calidad del agua del arroyo Arena en Santa María Huatulco</b>	118
Tania Gutiérrez-Macías	
Graciela Flores Hernández	
Juan Gabriel García Maldonado	
Petia Mijaylova Nacheva	
<b>Agua para uso público urbano en la región lagunera, México</b>	133
Carlos Chairez Araiza	



## PRESENTACIÓN

El saneamiento es un conjunto de disposiciones legales y técnicas encaminadas a mejorar la calidad de la vida humana. Algunas de esas son: eliminación de residuos urbanos e industriales, construcción de la red de alcantarillado, mejoramiento de las calles, entre otros. Particularmente es la creación o mantenimiento de las condiciones de limpieza e higiene que ayudan a prevenir las enfermedades mediante servicios como la recolección de basura y la eliminación de aguas residuales, lo cual se logra implementando tecnologías. Es importante que dichas tecnologías tomen en cuenta el contexto de gobernanza donde se implementan para poder incrementar sus posibilidades de éxito.

Las tecnologías de saneamiento son herramientas que se utilizan para mejorar la calidad de vida de las personas. Estas tecnologías pueden incluir sistemas de tratamiento de agua potable y aguas residuales, sistemas de gestión de residuos y tecnologías de saneamiento para áreas urbanas y rurales. El objetivo de las tecnologías de saneamiento es mejorar la eficiencia de los sistemas sanitarios y reducir los riesgos para la salud y el ambiente. Además, estas tecnologías también pueden ser una herramienta importante para el desarrollo sostenible, al promover la gestión responsable de los recursos naturales y la protección del ambiente.

### *Reseña*

Los extensos que a continuación se leerán tratan sobre la temática de agua, en total son 10 artículos que abordan como tema central los problemas que presenta el agua en las condiciones actuales y lo que se puede hacer para prevenir su escasez y contaminación, algunos de ellos proponen el uso de tecnologías como la IA (inteligencia artificial), el IoT (el internet de las cosas), entre otros tipos de tecnologías.

*Reseña de aportaciones al tema*

En el artículo *Caracterización de la sequía meteorológica en la cuenca Cállico, departamento de Matagalpa, Nicaragua*, se utilizó una metodología del Índice de Estandarización de la Precipitación (SPI) en aras de determinar la intensidad, duración y magnitud del fenómeno en cuestión a través del uso de nueve estaciones virtuales extraídas de imágenes CHIRPS en un periodo que comprende 30 años (1993-2022).

**Salvador Peña Díaz**, en el artículo “La cuenca del río Conchos bajo un alarmante estrés hídrico” estudió la demanda del agua potable por parte de la población lo que ha ocasionado estrés hídrico actualmente en la zona.

**Harvin Joel Bonilla Escoto** en el artículo “Caracterización de la sequía meteorológica en la Cuenca Cállico, Departamento de Matagalpa, Nicaragua” analiza la sequía como un fenómeno que se caracteriza por la reducción de la precipitación respecto de su media histórica, lo que trae repercusiones en diferentes ámbitos, desde el nivel meteorológico hasta el agrícola e hidrométrico. En este sentido, la cuenca Cállico, la cual se localiza en la parte alta del Río Grande de Matagalpa en Nicaragua, no es la excepción, ya que en el pasado reciente ha sufrido las consecuencias de este fenómeno, con una repercusión importante en el sector agrícola. El presente extenso tiene por objetivo caracterizar la sequía meteorológica en la cuenca del Río Cállico, en el Departamento de Matagalpa, Nicaragua.

**Aldo Antonio Castañeda Villanueva**, en el artículo “Aportación para el ODS 6: desarrollo de sistemas para el saneamiento y reúso de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos en zonas rurales en el occidente de México”, evalúa sistemas alternativos de saneamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos (HC) en el área rural, como estrategia reproducible para disminuir la contaminación de cuerpos de agua superficiales y contribuir con el cumplimiento de proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua (ODS 6).

**Miguel Angel Imaz-Lamadrid, Jobst Wurl, María Z. Flores-López y Pablo Hernández-Morales**, en el artículo “Gestión de recarga de acuíferos (mar) vs desalinización; la búsqueda de alternativas sostenibles. Caso de estudio Baja California Sur, México”, proponen una estrategia ambientalmente más amigable como son las obras hidráulicas cuyo principal problema es que no aportarían un caudal constante por su

dependencia con el clima. En este contexto, el trabajo analiza los beneficios e impactos de ambas propuestas considerando aspectos hidrológicos, ambientales y económicos y en el contexto de las proyecciones de cambio climático esperadas para la entidad.

**Néstor DelaPaz-Ruíz**, en el artículo “Spatiotemporal data for managing domestic wastewater”, sugiere proveer datos sobre la calidad y cantidad de aguas residuales domésticas en los bloques vecindarios con el apoyo de sensores de agua, Internet de las cosas (IoT) y simulaciones estadísticas.

**César Casiano Flores y A. Paula Rodríguez Müller**, en el artículo “A Governance analysis of the role of artificial intelligence in the European water sector”, realizaron el análisis de tres casos (Portugal, Polonia y Países Bajos) en los que se ha implementado inteligencia artificial en el sector del agua. El análisis utiliza el marco analítico quién-cómo-qué dentro del enfoque de modos de gobernanza de jerarquía, mercado y red. Dicho análisis permitió la identificación de los diferentes modos de gobernanza en los que la implementación de inteligencia artificial en el sector agua para promover la innovación.

**María de Lourdes Ballinas Casarrubias, María del Carmen González Horta, María del Rocío Infante Ramírez y Margarita Sofía García Madrid**, en el artículo “Uso indiscriminado del recurso hídrico por el sector agrícola y afectación en el abastecimiento urbano (CD. Jiménez, Chihuahua)”, analizaron tanto el abatimiento de los niveles de los pozos que suministran de agua a la ciudad, como el hecho de que existen tecnologías *in-situ*, que no han podido ponerse en marcha por falta de las condiciones hidráulicas debido al uso indiscriminado en los pozos nogaleros que circundan a la ciudad.

**Mónica Nayeli Velasco-Estudillo, Jaqueline Reséndiz y Leydi Diana Morales Díaz** en el artículo “Perspectivas sociales de la calidad del agua en Zimapán-Hidalgo” presentaron algunas de las perspectivas sociales bajo las cuales analizaron el problema de la calidad del agua en Zimapán-Hidalgo a fin de proponer soluciones colaborativas que contribuyan a asegurar el derecho humano al agua potable y al saneamiento.

**Tania Gutiérrez-Macías, Graciela Flores Hernández, Juan Gabriel García Maldonado y Petia Mijaylova Nacheva**, en el artículo “Monitoreo de la calidad del agua del arroyo Arena en Santa María Huatulco”, realizaron el monitoreo de parámetros de calidad del agua a lo largo del arroyo Arena. Se monitorean parámetros indicadores de la calidad del agua durante dos temporadas (sequía y lluvia).

**Carlos Chairez Araiza** en el artículo “Agua para uso público urbano en la región lagunera, México” documenta y analiza el servicio público urbano proporcionado por los organismos operadores de agua potable (OOAP) y la calidad del agua y disponibilidad media anual del acuífero Principal (0523) región Lagunera, Coahuila.

Los temas de este fascículo abordan investigaciones en relación con el ODS 6 Agua y saneamiento, tomando el tema de la sequía de cuencas que son utilizadas como fuente de agua potable por los pobladores aledaños a estas, sequía provocada ya sea por cambio climático o por la alta demanda de agua, pudiendo agotarse este recurso vital. En el mismo tema de agua, se presentó la investigación de sistema de tratamiento de agua residual doméstica utilizando la tecnología de humedales. De igual modo, se presentaron artículos donde se proponen el uso de tecnologías como la IA (inteligencia artificial), el IoT (el internet de las cosas), entre otros tipos.

En este contexto, el saneamiento y las tecnologías asociadas son esenciales para mejorar la calidad de vida de las personas y proteger el ambiente. La falta de acceso a agua potable, sigue siendo un problema en muchas partes del mundo, lo que puede tener graves consecuencias para la salud pública y el desarrollo sostenible.

Sin embargo, a medida que la tecnología avanza y se desarrollan nuevas soluciones de saneamiento, hay razones para ser optimistas sobre el futuro. Al trabajar juntos para mejorar la gestión del agua, podemos hacer una diferencia real en la vida de las personas y el ambiente.

Carlos Alberto Ávila Orta; Centro de Investigación  
en Química Aplicada (CIQA), México

Cinthya Valeska Castro Pérez; Universidad Nacional Agraria (UNA), Nicaragua  
César Casiano Flores; University of Twente (UT), Países Bajos y KU Leuven, Bélgica

# LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS BAJO UN ALARMANTE ESTRÉS HÍDRICO

Salvador Peña Díaz

## Resumen

Actualmente unos 100 de los 653 “acuíferos” (Zonas de Gestión y Administración del Agua Subterránea) definidos a nivel nacional, están sobre explotados, debido a que la extracción de agua rebasa su recarga, estimándose que el minado de su reserva de agua ha llegado al ritmo actual del orden de 6,000 hectómetros cúbicos por año ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ), con una disminución del almacenamiento en los últimos 50 años de unos 90,000  $\text{hm}^3$ . La cuenca del Río Conchos se ubica en el norte del país, cubre un área de 74,300  $\text{km}^2$  definida como zona de Gestión y Administración del Agua. Dentro de la cuenca se encuentran cuatro distritos de riego que en total tienen superficie de riego de 94,500 ha y aprovechan un volumen de agua de 1,200  $\text{hm}^3/\text{año}$ . El total de la superficie de riego dentro de la cuenca es de 214,000 ha, considerando el valor medio de la lámina de riego en los distritos de riego (1.34 m), resulta un volumen usado en la agricultura de unos 2,660  $\text{hm}^3$  anuales. La población actual de 3.3 millones de habitantes y el agua destinada para el uso público urbano es de 421  $\text{hm}^3/\text{año}$ , con dotación diaria de 300 litros por habitante. El déficit de la disponibilidad de agua subterránea fue en 2013 de 398  $\text{hm}^3/\text{año}$  y en 2020 de 687  $\text{hm}^3/\text{año}$ . Para las aguas superficiales, en el año de 2015 el déficit fue de 296  $\text{hm}^3/\text{año}$ , de 265  $\text{hm}^3/\text{año}$  en el 2020. En total, se puede considera que el déficit de la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del Río Conchos resulta de unos 1,000  $\text{hm}^3/\text{año}$ . Por lo tanto, se requiere una gestión integrada de los recursos hídricos implementando el

“Programa Hídrico de la Cuenca del río Concho”, definiendo la disponibilidad, el uso y aprovechamiento del recurso, así como las estrategias, prioridades y políticas, para lograr un desarrollo sustentable en la cuenca y avanzar en la gestión integrada de los recursos hídricos. Pero con miras a disminuir la demanda.

**Palabras claves:** acuíferos, estrés hídrico, cuenca hidrológica.

## **Introducción**

Actualmente dentro de los límites de la República Mexicana, unos 100 de los 653 “acuíferos” (Zonas de Gestión y Administración del Agua Subterránea) definidos a nivel nacional, están sobre explotados, debido a que la extracción de agua rebasa su recarga, estimándose que en el transcurso de las últimas cinco décadas el minado de su reserva de agua se ha incrementado gradualmente hasta llegar al ritmo actual del orden de 6,000 hectómetros cúbicos por año ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ), con una disminución del almacenamiento en ese lapso, del orden de  $90,000 \text{ hm}^3$  (CONAGUA,2013).

Lo anterior es la antítesis de la sostenibilidad de las actividades económicas y sociales que actualmente dependen en gran medida del recurso hídrico. El objetivo de este escrito es mostrar un caso con serios problemas ante la escasez del recurso hídrico.

## **Materiales y métodos**

La cuenca del Río Conchos se ubica en el norte del país, es el afluente más importante del río Bravo, corriente que sirve de límite entre los Estados Unidos de América y México. El país está dividido en 757 cuencas y según la *Ley: la cuenca hidrológica juntamente con los acuíferos constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas*. El área oficial definida por la CONAGUA es de  $75,300 \text{ km}^2$  como zona de Gestión y Administración del Agua, donde se agregaron  $6,900 \text{ m}^2$  que corresponden a una porción de la cuenca del río Bravo.

Esta cuenca está ubicada casi totalmente en el estado de Chihuahua y sólo una pequeña parte de está asentada en el estado de Durango. Está integrada por las subcuencas principales: Río Florido, Río Conchos–Presa de la Colina, Río San Pedro, Río Conchos–

Presas El Granero y Río Conchos –Ojinaga (Figura 1). La cuenca del río Conchos es parte de la región hidrológica número 24, localizada en el norte de México (Hernández & Patiño, 2018).

Dentro de los límites de la cuenca se encuentran cuatro distritos de riego; 005 Delicias (70,700 ha), 009 Valle de Juárez (93,343 ha), 090 Bajo Río Conchos (3,221 ha) y 103 Alto Río Conchos (11,200 ha), en total los cuatro distritos contemplan una superficie de riego de unas 94,500 ha en donde se aprovecha un volumen de agua de 1,200 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales sólo el 4 % proviene de aguas subterráneas (SAGARPA, 2021).

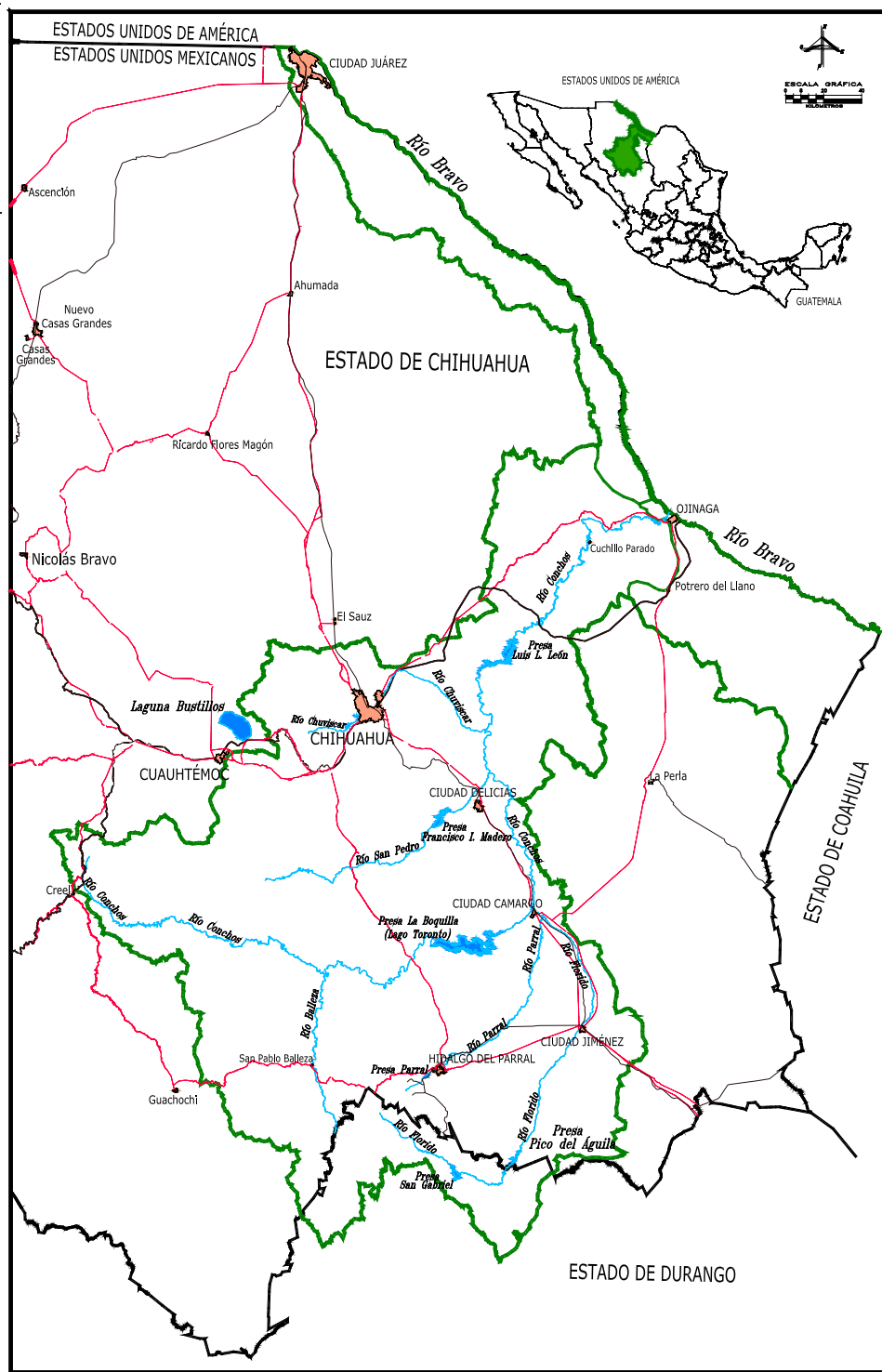
En total la superficie de riego, según el SIACOM en 2020 se sembraron 214,000 ha y si se considera el mismo valor medio de la lámina de riego estimada en los distritos de riego (1.34 m), resulta un volumen usado en la agricultura de unos 2,660 hm<sup>3</sup> anuales.

Dentro de la cuenca se encuentran las principales ciudades del estado de Chihuahua: Ciudad Juárez, Chihuahua, Delicias, Parral, Camargo, Meoqui, Jiménez y Ojinaga, entre otras. En los 43 municipios (Figura 2) que integran la cuenca existe una población actual de 3.3 millones de habitantes, la cual será de 3.5 millones en el año 2030, según CONAPO (2015).

El agua producida para el uso público urbano en el año 2018 es de 421 hm<sup>3</sup>/año, valor que, entre la población da como resultado una dotación diaria de unos 300 litros por habitante, valor que aplicado a la población actual (2022) resulta un volumen bruto de unos 423 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2018).

Figura 1

Cuenca del Río Conchos





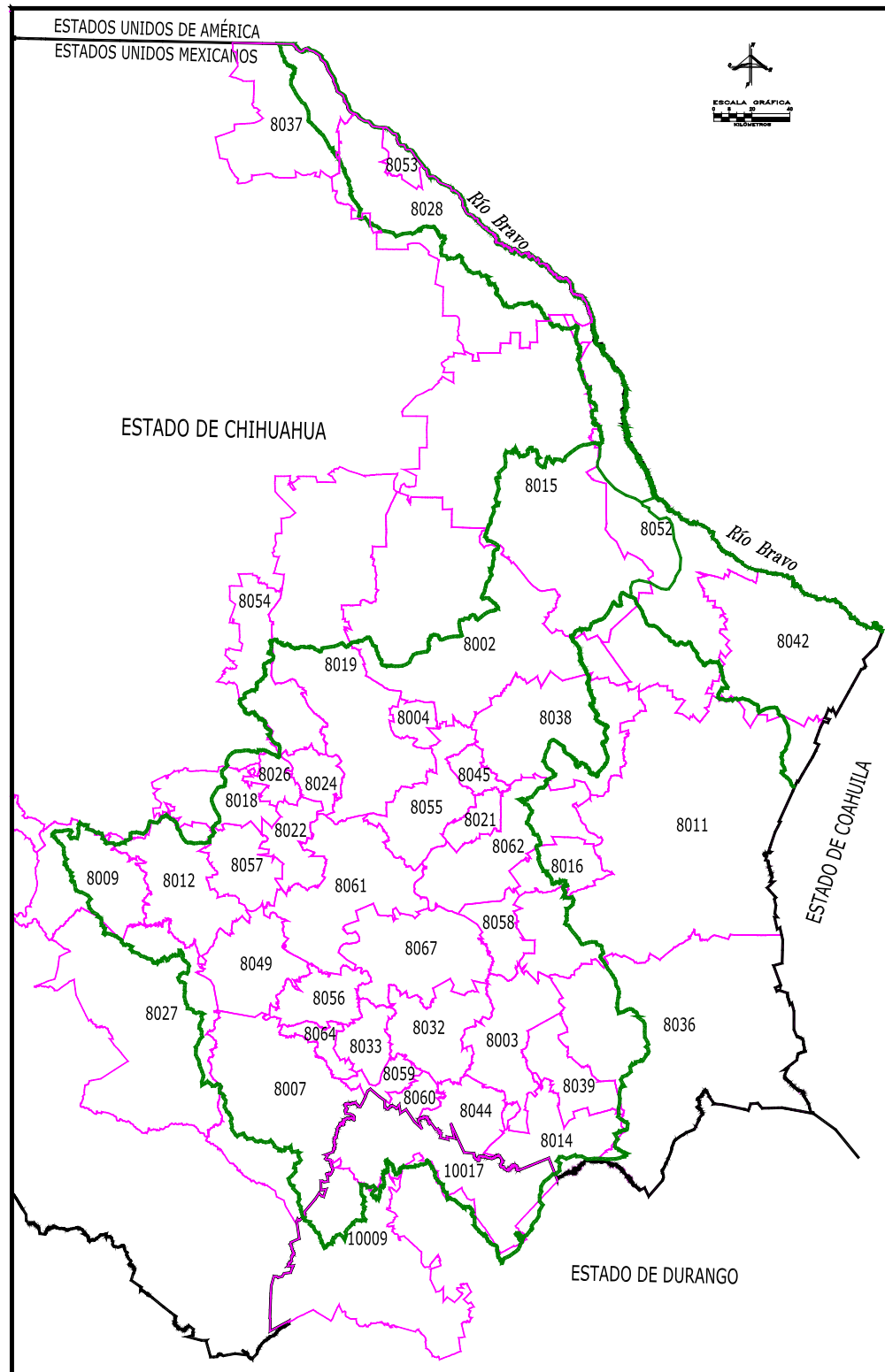
**Tabla 1**

*Municipios que integran la Cuenca Río Conchos*

<b>Estado</b>	<b>Nombre</b>	<b>No.</b>	<b>Estado</b>	<b>Nombre</b>	<b>No.</b>
Chihuahua	Aldama	8002	Chihuahua	Juárez	8037
Chihuahua	Allende	8003	Chihuahua	Julimes	8038
Chihuahua	Aquiles Serdán	8004	Chihuahua	López	8039
Chihuahua	Balleza	8007	Chihuahua	Manuel Benavides	8042
Chihuahua	Bocoyna	8009	Chihuahua	Matamoros	8044
Chihuahua	Camargo	8011	Chihuahua	Meoqui	8045
Chihuahua	Carichi	8012	Chihuahua	Nonoava	8049
Chihuahua	Coronado	8014	Chihuahua	Ojinaga	8052
Chihuahua	Coyame del Sotol	8015	Chihuahua	Praxedis G. Guerrero	8053
Chihuahua	La Cruz	8016	Chihuahua	Riva Palacio	8054
Chihuahua	Cusihuirachi	8018	Chihuahua	Rosales	8055
Chihuahua	Chihuahua	8019	Chihuahua	Rosario	8056
Chihuahua	Delicias	8021	Chihuahua	San Francisco de Borja	8057
Chihuahua	Dr. Belisario Domínguez	8022	Chihuahua	San Francisco de Conchos	8058
Chihuahua	Santa Isabel	8024	Chihuahua	San Francisco del Oro	8059
Chihuahua	Gran Morelos	8026	Chihuahua	Santa Bárbara	8060
Chihuahua	Guachochi	8027	Chihuahua	Satevó	8061
Chihuahua	Guadalupe	8028	Chihuahua	Saucillo	8062
Chihuahua	Hidalgo del Parral	8032	Chihuahua	El Tule	8064
Chihuahua	Huejotitán	8033	Chihuahua	Valle de Zaragoza	8067
Chihuahua	Jiménez	8036	Durango	Guanaceví	10009
			Durango	Ocampo	10017

En total la población dentro de la cuenca representa el 83 % de la población total del estado de Chihuahua y dentro de los límites de la cuenca se produce el 40 % del Producto Interno Bruto del estado de Chihuahua (IMTA, 2018).

**Figura 2**  
*División municipal*



Dentro de los límites de la cuenca, la CONAGUA define 28 acuíferos, mismos que se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 3.

**Tabla 2**

*Acuíferos dentro de los límites de la cuenca del Río Conchos*

	<b>Clave</b>	<b>Nombre</b>		<b>Clave</b>	<b>Nombre</b>		<b>Clave</b>	<b>Nombre</b>
1	830	Chihuahua-Sacramento	11	841	Potrero del Llano	21	852	Laguna de Jaco
2	831	Meoqui-Delicias	12	842	Álamo chapo	22	854	Rancho Denton
3	832	Jimenez-Camargo	13	843	Bocoyna	23	855	Laguna Los Alazanes
4	834	Parral-Valle del Verano	14	844	valle de zaragoza	24	856	Laguna el Rey
5	835	Tabalaopa-Aldama	15	845	San Felipe de Jesús	25	857	Escalón
6	836	Aldama-San Diego	16	846	Corichi-Nonoava			
7	837	Bajo Río Conchos	17	848	Laguna de Palomas	26	1007	Providencia
8	838	Alto Río San Pedro	18	849	Llano de Gigantes	27	1008	Cabrera-Ocampo
9	839	Manuel Benavides	19	850	Las Pampas	28	1014	Torreón de Cañas
10	840	Villalba	20	851	Rancho el Astillero			

La Ley de Aguas Nacionales menciona en la definición XVI que la cuenca hidrológica juntamente con los acuíferos constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).

Por otro lado, en el artículo 14 BIS 5 enumera los principios que sustentan la política hídrica nacional:

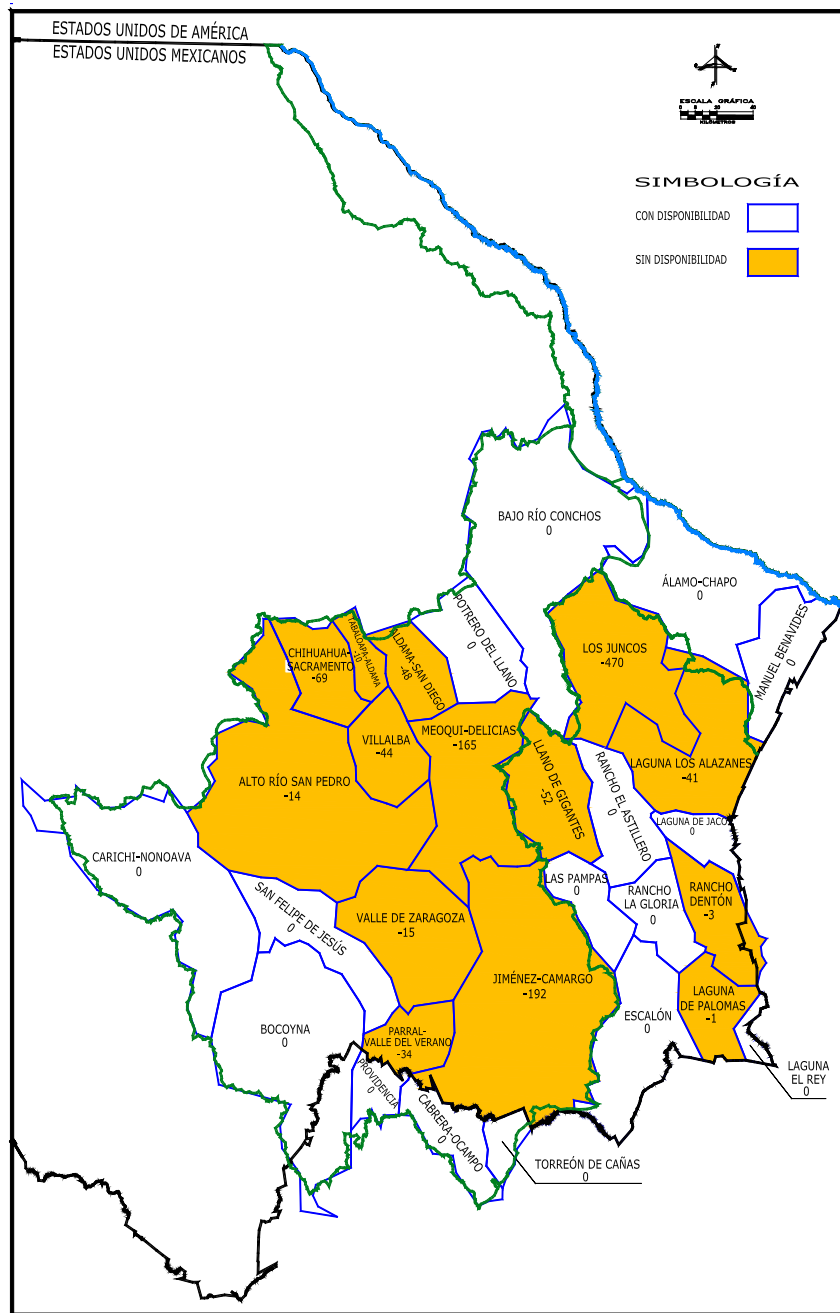
1. El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional;

2. La gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca hidrológica es la base de la política hídrica nacional;
3. El Ejecutivo Federal se asegurará que las concesiones y asignaciones de agua estén fundamentadas en la disponibilidad efectiva del recurso en las regiones y cuencas hidrológicas que correspondan, e instrumentará mecanismos para mantener o reestablecer el equilibrio hidrológico en las cuencas hidrológicas del país y el de los ecosistemas vitales para el agua.

Dentro de la cuenca del Río Conchos, se encuentran 28 zonas de gestión y administración del agua subterránea, 25 de ellas se ubican en el estado de Chihuahua y tres en el estado de Durango, tal como se puede ver en la Figura 3 y en la Tabla 2.

**Figura 3**

*Zonas con y sin disponibilidad de agua subterránea. Año 2020. Cuenca del Río Conchos*



## Resultados y discusión

Un análisis de la disponibilidad de agua subterránea que se ha publicado según la NOM-11-CNA-2015, los resultados son alarmantes, ya que la disponibilidad calculada en el año

de 2013 (466 hm<sup>3</sup>/año) disminuyó en el año 2020 a casi la mitad (286 hm<sup>3</sup>/año), asimismo el déficit calculado se incrementó notablemente como se puede ver en la Tabla 3 y en las Figuras 2 y 3 (CONAGUA, 2000).

La disponibilidad se calcula realizando un balance hídrico y despejar la recarga a la que se le restan las concesiones otorgadas.

**Tabla 3**

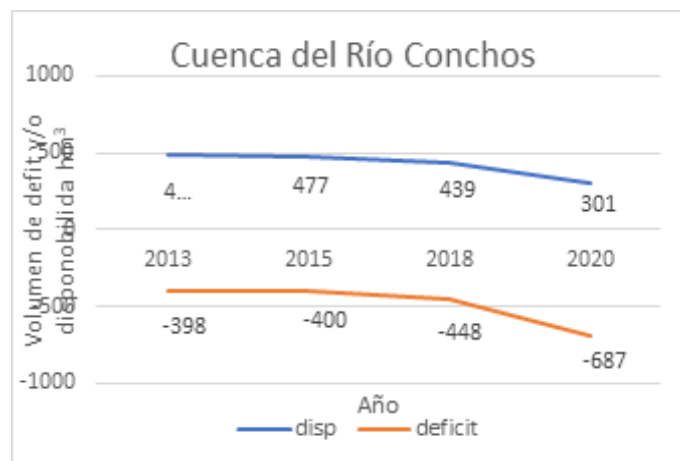
*Disponibilidad y/o déficit según los documentos publicados (CONAGUA, 2013, 2015 y 2018)*

Año	Volumen hm <sup>3</sup> /año		Número de acuíferos	
	Disponibilidad	Déficit	Disponibilidad	Déficit
2013	466	-398	24	4
2015	461	-400	24	4
2018	424	-448	19	9
2020	286	-687	15	13

El número de acuíferos con disponibilidad disminuyó de 24 en el año 2013 a 15 en el 2020. De igual forma los acuíferos con déficit se incrementaron de 4 a 13 en el mismo periodo.

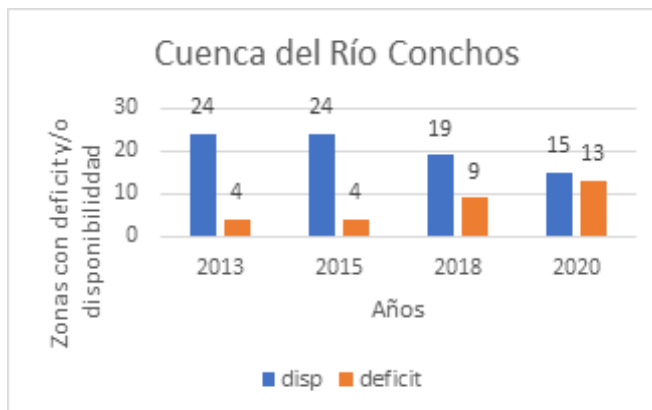
**Figura 4**

*Volumen de disponibilidad y/o déficit en los acuíferos que integran la cuenca del Río Conchos*



### Figura 5

*Número de acuíferos con disponibilidad y/o déficit en los acuíferos que integran la Cuenca del Río Conchos*



Por lo que respecta a la disponibilidad de las aguas superficiales, en el año de 2015 el déficit fue de 296 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2018), para el año de 2016 el déficit 289 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2016) y para el 2020 de 265 hm<sup>3</sup>/año en el 2020 (CONAGUA, 2020).

Finalmente, el déficit de la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del Río Conchos es del orden de 687 hm<sup>3</sup>/año de aguas subterráneas y de 265 hm<sup>3</sup>/año de agua superficial, lo que resulta el déficit total de unos 1,000 hm<sup>3</sup>/año para esta cuenca, lo que es alarmante y constituye un atentado contra de la sustentabilidad de los sectores económicos y sociales en esta región.

Por lo tanto, se requiere una gestión integrada de los recursos hídricos en esta cuenca para cumplir con la política mencionada en la Ley de Aguas Nacionales implementando el “Programa hídrico de la Cuenca del Río Conchos”, documento en el cual se definirán la disponibilidad, el uso y aprovechamiento del recurso, así como las estrategias, prioridades y políticas, para lograr el equilibrio del desarrollo regional sustentable en la cuenca correspondiente y avanzar en la gestión integrada de los recursos hídricos (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012).

La planeación de estos casos requiere un cambio de paradigma, en donde en lugar de incrementar la oferta incrementando la extracción con la consiguiente disminución del almacenamiento subterráneo, se debe manejar la demanda hacia una disminución del uso.

Dentro de este programa hídrico, se deberá contemplar las siguientes acciones:

1. Inicialmente realizar una revisión de los aprovechamientos del agua superficial, subterránea y residual, y el uso al que se destina el agua, su levantamiento de campo y su correspondiente concesión, estimando el volumen usado mediante medidores o aforos o algún método indirecto comparar con el volumen usado con el concesionario.
2. Debido a que se ha agotado y aún rebasada el agua disponible en la región, no queda otra que disminuir la demanda de agua. Sobre este aspecto, los usos principales son el agrícola y el público urbano, sin olvidar los otros como la industria, doméstico, ganadero y servicios.
3. Por lo que respecta al uso agrícola, para disminuir la demanda se proponen algunas acciones, en los distritos de riego continuar con el programa implementado hace algunos años acerca de apoyar con financiamiento sistemas de riego más eficientes con la consigna de renunciar parte de las concesiones con la disminución del volumen utilizado. Programa que tuvo bastante éxito. Indudablemente cancelar los aprovechamientos que no cuentan con la concesión respectiva.
4. Por lo que se refiere a los otros usuarios del sector agrícola, al igual que en los distritos de riego iniciar con la cancelación de aquellos aprovechamientos que no cuenten con la concesión respectiva y aquellos que excedan en los volúmenes concesionados vigilar su cumplimiento. Se sabe de algunos volúmenes que son extraídos directamente de los cauces de los ríos mediante equipos de bombeo portátiles, aprovechamientos que deberán cancelarse.
5. En el uso público urbano complementar la totalidad de la medición en tomas domiciliarias y en las fuentes de abasto.
6. Una vez que se tiene la medición completa, iniciar acciones para disminuir el uso y evaluando estas acciones para definir aquellas más efectivas y con el menor costo.

## **Bibliografía**

- CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. (2012, June 8). *Ley de Aguas Nacionales*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- CONAGUA. (2013a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*.



[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5327360&fecha=20/12/2013#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5327360&fecha=20/12/2013#gsc.tab=0)

CONAGUA. (2013b, April 5). *ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en los tres acuíferos que se indican.* ACUERDO General Por El Que Se Suspende Provisionalmente El Libre Alumbramiento En Los Tres Acuíferos Que Se Indican. . [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0)

CONAGUA. (2015a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.* [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015#gsc.tab=0)

CONAGUA. (2015b). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.* [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0)

CONAGUA. (2016). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos.* [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5443858&fecha=07/07/2016](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5443858&fecha=07/07/2016)

CONAGUA. (2018a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican.* [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018#gsc.tab=0)

CONAGUA. (2018b). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.* <https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento>

CONAGUA. (2020a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos*

- que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.*  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020)
- CONAGUA. (2020b). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos.* [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020)
- CONAPO. (2015). *Proyecciones de la Población de los municipios de México, 2015-2030.* <https://www.gob.mx/conapo/articulos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030-215756.%20Proyecciones%20de%20la%20Poblacin%20de%20los%20municipios%20de%20Mxico>
- Hernández, P., & Patiño, C. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Concho. In *La Cuenca del Río Bravo y el Cambio Climático* (Primera, pp. 230–250). Fundación Universidad de las Américas. [https://www.researchgate.net/publication/328432497\\_Modelacion\\_hidrologica\\_de\\_la\\_cuenca\\_alta\\_del\\_rio\\_Conchos](https://www.researchgate.net/publication/328432497_Modelacion_hidrologica_de_la_cuenca_alta_del_rio_Conchos)
- IMTA. (2018). *La Cuenca del Río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático.*
- SAGARPA. (2021). *Panorama Agroalimentario 2021.* <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

# **CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LA CUENCA CÁLICO, DEPARTAMENTO DE MATAGALPA, NICARAGUA**

Harvin Joel Bonilla Escoto

## **Resumen**

La sequía es un fenómeno que se caracteriza por la reducción de la precipitación respecto de su media histórica, lo que trae repercusiones en diferentes ámbitos, desde el nivel meteorológico hasta el agrícola e hidrométrico. En este sentido, la cuenca Cálico, la cual se localiza en la parte alta del Río Grande de Matagalpa en Nicaragua, no es la excepción, ya que en el pasado reciente ha sufrido las consecuencias de este fenómeno, con una repercusión importante en el sector agrícola. El presente extenso tiene por objetivo caracterizar la sequía meteorológica en la cuenca del Río Cálico, en el Departamento de Matagalpa, Nicaragua. Para responder este objetivo se implementó la metodología del Índice de Estandarización de la Precipitación (SPI) en aras de determinar la intensidad, duración y magnitud del fenómeno en cuestión a través del uso de nueve estaciones virtuales extraídas de imágenes CHIRPS en un periodo que comprende 30 años (1993-2022). Se concluye que la precipitación de las estaciones valoradas presenta un comportamiento estacionario a lo largo del tiempo, mientras a nivel espacial, aumenta levemente de oeste a este, lo que a su vez repercute sobre otras variables que se derivan sobre esta variable tales como los periodos de retorno. Las intensidades clasificadas como extremadamente seco son menos recurrentes que aquellas clasificadas como severamente seco, sin embargo, las primeras presentan mayor duración en el tiempo y, por ende, su

magnitud aumenta, lo que se traduce en una exacerbación del fenómeno en la región, particularmente sobre las actividades agropecuarias.

**Palabras clave:** cambio climático, índice de estandarización de la precipitación (SPI), nivel espacial, sequía meteorológica.

## **Introducción**

La sequía meteorológica es un fenómeno que ha afectado a muchas regiones del mundo en los últimos años, potenciado posiblemente por el Cambio Climático. La sequía meteorológica es una condición atmosférica caracterizada por un déficit en la cantidad de precipitación que normalmente se presenta en una región y en un periodo de tiempo específico (Guttman, 1999; Komuscu, 1999; Wilhite, 2000 citado por Núñez *et al.*, 2007).

La severidad de la sequía depende del grado de reducción de la lluvia, duración y extensión geográfica, así como de la demanda de agua para la permanencia de los sistemas naturales y el desarrollo de las actividades humanas (Núñez *et al.*, 2007).

Según Below *et al.* (2007), las sequías causaron más del 50 % del total de muertes debidas a desastres naturales entre el 1900 y el 2004, representaron el 35 % de la población afectada por desastres y el 7 % de las pérdidas económicas, después de las inundaciones y los terremotos.

Asimismo, Bernstein *et al.*, (2007) reporta un incremento en la intensidad y duración de la sequía en diferentes regiones del mundo.

Si bien, la sequía es un fenómeno que afecta a toda la sociedad en subconjunto, uno de los sectores más afectados lo constituye el sector agropecuario.

Bajo este contexto, la cuenca del Río Cállico se localiza en la región Central de Nicaragua y su actividad económica principal es la agricultura, específicamente la siembra de granos básicos como frijol y maíz.

Así, de acuerdo con Rodríguez (2014), en la época de primera 2014, durante una de las sequías más importantes ocurridas en la región en los últimos años, en el municipio de San Dionisio trajo consigo pérdidas en el cultivo del frijol en un 79 % lo que significa que las familias dejaron de percibir unos C\$ 4, 572,062.

El objetivo del presente estudio es caracterizar la sequía meteorológica en la cuenca del Río Cállico, en el Departamento de Matagalpa, Nicaragua, esto con el fin de favorecer

la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático.

Por lo tanto, se busca contribuir al conocimiento científico sobre este tema y proporcionar información útil para la toma de decisiones. En este sentido, se presenta un marco conceptual breve sobre la sequía, posteriormente, se describirá a groso modo la metodología implementada en el presente artículo, a continuación, los resultados y discusiones generados sobre el tema en cuestión, para finalmente, finalizar con las conclusiones generadas a partir de los resultados.

## **Marco conceptual**

### *Sequía*

La sequía puede entenderse como la reducción parcial o total de las precipitaciones en un lugar y tiempo determinados; esta hace parte de la variabilidad natural del clima y se percibe como una anomalía del ciclo hidrológico cuyas características dependen del régimen climático zonal, siendo en consecuencia uno de los fenómenos hidrometeorológicos más complejos (Zabaleta *et al.*, 2022).

La anterior definición le confiere a la sequía un carácter relativo y no absoluto, ya que el impacto que genera este fenómeno dependerá del contexto físico y socioeconómico, así como tecnológico sobre el cual se desarrolla. Es así como, en ciertas regiones lo que se considera sequía puede constituir los valores típicos de precipitación para otras y, sin embargo, esto no deja de atenuar las repercusiones que genera el fenómeno en cuestión en dichos lugares.

En este punto es interesante resaltar, que, en multitud de ocasiones, el conjunto de la sociedad tiende a confundir y utilizar indistintamente los términos de sequía, aridez y escasez, siendo estos conceptos diferentes (Ruiz, 2020).

### *Tipos de sequía*

Si bien, la sequía está referida principalmente a la reducción de las precipitaciones con repercusión en ciertas variables del ciclo hidrológico, sus consecuencias se presentan

a diferentes escalas tanto temporales como espaciales. En este particular, la forma de cuantificar la reducción genera diferentes tipos de sequía en referencia con el marco de referencia que se desea evaluar.

En consecuencia, se suele distinguir al menos tres categorías de sequía: meteorológica, agrícola e hidrológica.

La primera, según Ruiz (2020), está basada en el uso de datos climáticos. El mismo autor advierte que ante la dificultad de establecer la duración y magnitud del déficit pluviométrico válido para diferentes espacios geográficos, algunos autores optan por no especificar umbrales fijos en las definiciones de sequía meteorológica.

Por su parte, dado que la cantidad de agua que requiere cada especie de cultivo para su desarrollo óptimo es distinta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para una única área geográfica, como por ejemplo la Demarcación Hidrográfica del Segura (Valiente, 2001). Sin embargo, el mismo autor indica que una buena aproximación de definición es el periodo durante el cual solo hay 19 mm de agua disponible en los primeros 20 cm de suelo.

Finalmente, la sequía hidrológica está referida a los efectos de periodos de precipitación relativamente cortos, es decir a los escurrimientos a nivel de superficie y subsuelo, su impacto se ve reflejado en la recarga de acuíferos, lagos, presas. Los efectos son de largo plazo, es decir, en tanto la sequía agrícola presenta un efecto inmediato en los cultivos, la sequía hidrológica puede afectar la producción agrícola de varios años, la producción hidroeléctrica o la extracción de agua del subsuelo (Crespo, 2008).

### *Factores que conducen a la sequía*

Entre las causas más relevantes, para que se produzca la sequía Magaña *et al.*, (1997), Estrada (2001) y Contreras (2003) citados por Crespo (2008), mencionan las siguientes: Las manchas solares que alteran la cantidad de energía que llega a la superficie de la Tierra; las alteraciones en la circulación de los vientos generados por modificación en el albedo superficial o por cambios en la temperatura superficial de los océanos.

Dragovic (1997) señala que, si se analizan conjuntamente las condiciones climáticas y del suelo, y, sobre todo, su balance hídrico, es posible determinar el momento en el que se llega a la situación de sequía y aplicar rápidamente las medidas oportunas para paliar los

efectos negativos. En los suelos, la sequía se produce cuando se agota el agua disponible en la zona de actividad radicular (rizósfera), con independencia de las lluvias acumuladas en el periodo anterior. Estos efectos son particularmente importantes cuando se producen en fases fenológicas críticas, es decir, de máximas necesidades hídricas de las plantas.

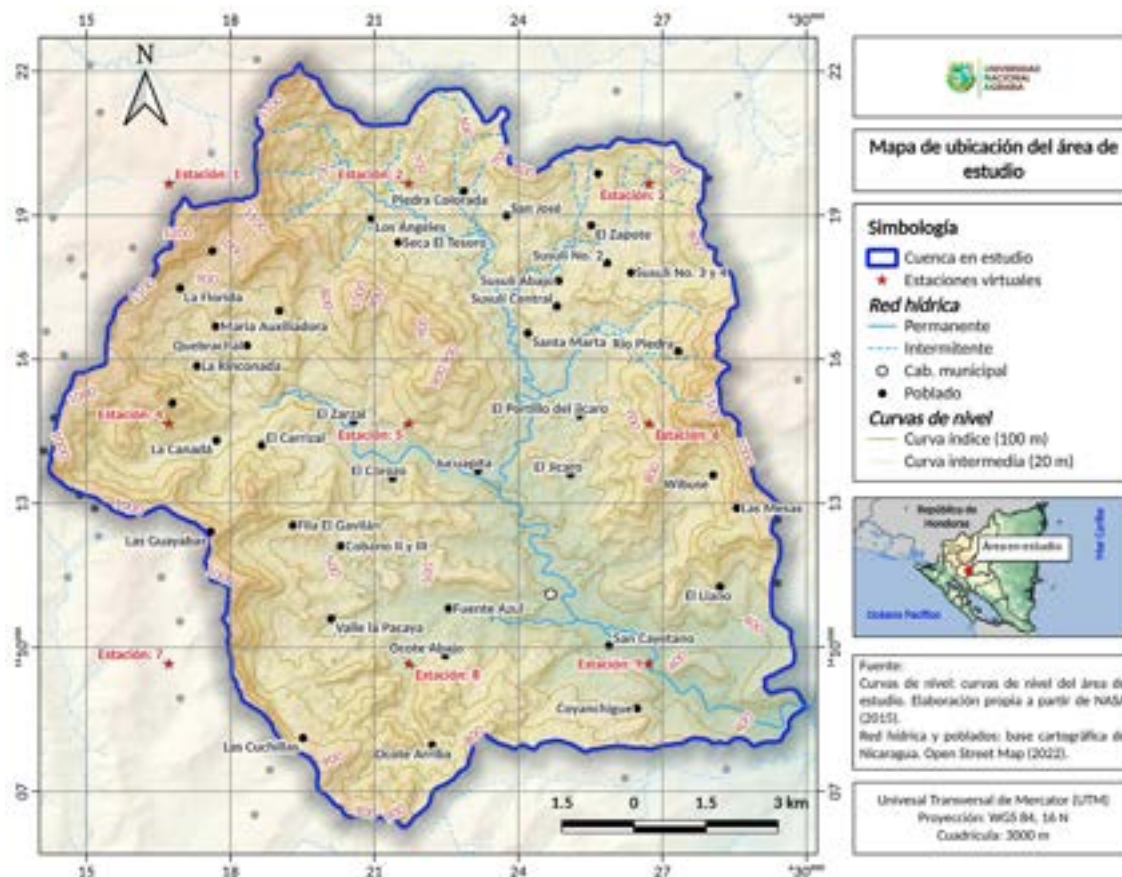
## Metodología

### Área de estudio

El área de estudio es una cuenca de aproximadamente 159.14 km<sup>2</sup>, localizada en la región central del país. Se distribuye sobre los municipios de San Dionisio (71.24 %), Matagalpa (25.93 %) y Terrabona (2.84 %).

## Figura 1

### Localización del área de estudio



La cuenca está enclavada sobre una zona montañosa con pendientes medias por encima del 20 %. La cuenca es denominada como tal debido al río que corre sus aguas de noroeste a sureste (NO-SE) y cuya desembocadura se produce sobre el Río Grande de Matagalpa. Según el Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE), (2008), la población del municipio de San Dionisio (municipio con mayor participación en la cuenca) asciende a un poco más de 16,000 habitantes.

AMUPNOR-INAFOR (2012) citado por García Rodríguez & Miranda Blandón, (2015) alude “...que la principal actividad que realizan los productores del municipio de San Dionisio está centrada en la producción de granos básicos y en menor escala de producción pecuaria, además de pequeñas pulperías, carpintería, albañilería, entre otras actividades menores. Lo segundo es una zona de bajo potencial productivo debido al uso intensivo que hacen los productos de los suelos y bosque. Lo tercero consta que los productores se han dedicado históricamente a granos básicos, lo que significa que el cultivo en su mayor parte es de forma tradicional, prevaleciendo la pequeña producción”.

#### *Fuentes de información y descripción general de los datos*

Los datos utilizados en el presente estudio fueron descargados de la plataforma Climate Engine a través de nueve (09) estaciones virtuales cuyas estaciones se detallan en el cuadro 1. Así, la serie analizada corresponde a datos de precipitación diarios provenientes de imágenes CHIRPS con resolución de 0.05° para un periodo de 30 años (1993-2022). Esta serie de datos fue agregada de forma mensual para los análisis correspondientes.



## Cuadro 1

### *Coordenadas de las estaciones virtuales*

<b>Estación virtual</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>
1	616717	1419654
2	621717	1419654
3	626717	1419654
4	616717	1414654
5	621717	1414654
6	626717	1414654
7	616717	1409654
8	621717	1409654
9	626717	1409654

### *Procesamiento de los datos*

En el presente estudio se recurrió a la implementación del cálculo de Índice Estandarizado de Precipitación, SPI por sus siglas en inglés. Según Edwards y McKee, (1997) citado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2012), este se basa en el registro de precipitaciones a largo plazo para un periodo deseado. Dicho registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal de modo que el SPI medio para la localidad y el periodo deseado sea cero.

Las series de datos de precipitación mensual fueron ordenados en las escalas de tiempo seleccionadas (3 meses) por estación (Zabaleta *et al.*, 2022). Para estimar el SPI se recurrió al uso del lenguaje estadístico R, a través de su IDE RStudio, implementando el paquete SPEI, generado por Beguería & Vicente-Serrano, (2023).

Los parámetros analizados a partir del SPI son la intensidad, la duración y la magnitud. El primer parámetro se analizó comparando los valores obtenidos de SPI con el siguiente cuadro:

## Cuadro 2

Valores de índice estandarizado de precipitación.

ID	SPI	Categoría
	>2.00	Extremadamente húmedo
	1.50 a 1.99	Muy húmedo
	1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
	-0.99 a 0.99	Normal
	-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
	-1.50 a 1.99	Severamente seco
	>-2.00	Extremadamente seco

Fuente: OMM (2012).

Por su parte, para calcular la duración se registró el número de meses consecutivos (mayor o igual a 3) en que el SPI superaba el umbral crítico, descartando aquellos meses aislados que cumplieron con este criterio. Finalmente, la magnitud se calculó a través de la siguiente expresión matemática indicada por Zabaleta *et al.*, (2022):

$$M = \sum_{i=1}^{n=12} SPI_i$$

Dónde,

M: magnitud del evento

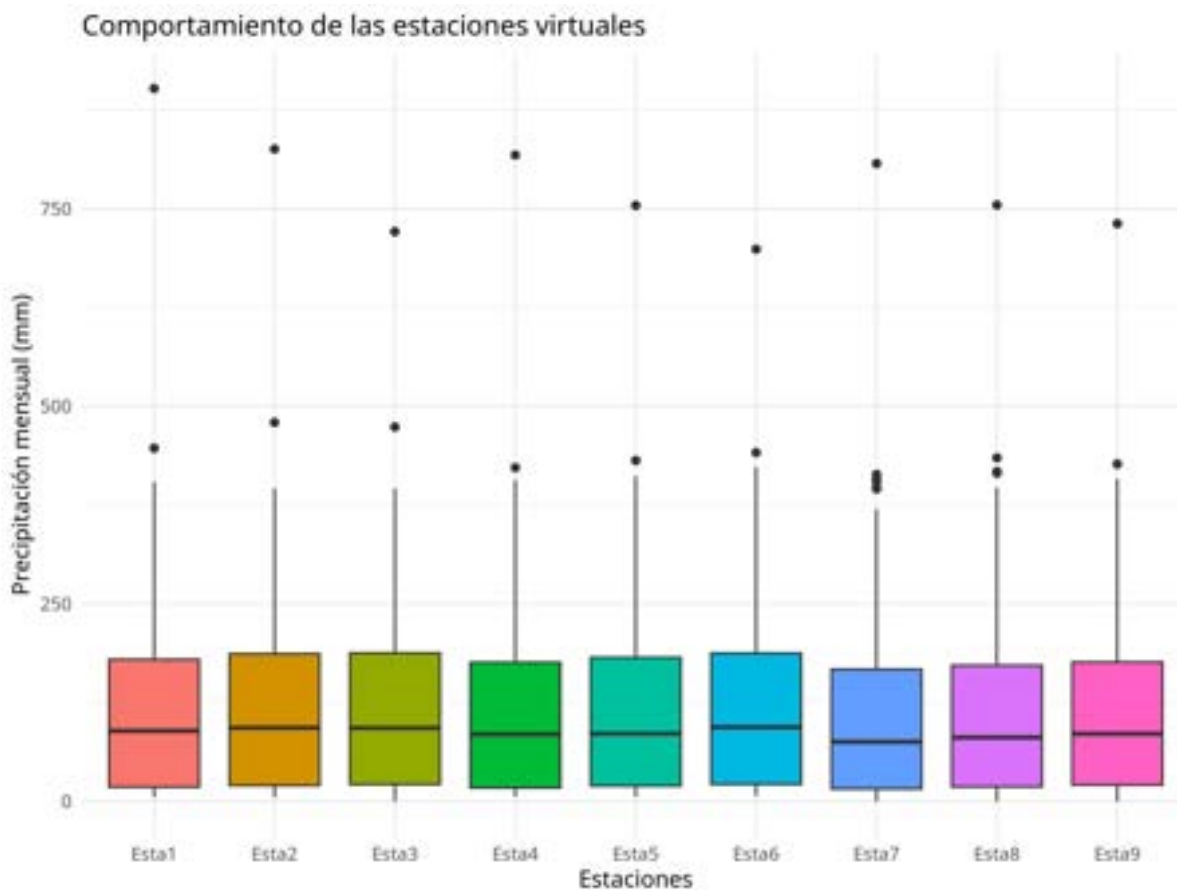
SPI<sub>i</sub>: índice individual de cada mes

## Resultados y discusión

La Figura 2 recopila el comportamiento de la precipitación del periodo analizado en cada una de las estaciones virtuales localizadas dentro y próximas a la cuenca en estudio según lo indicado en el acápite de metodología.

**Figura 2**

*Comportamiento a lo largo del tiempo de la precipitación en las estaciones virtuales de la cuenca en estudio*

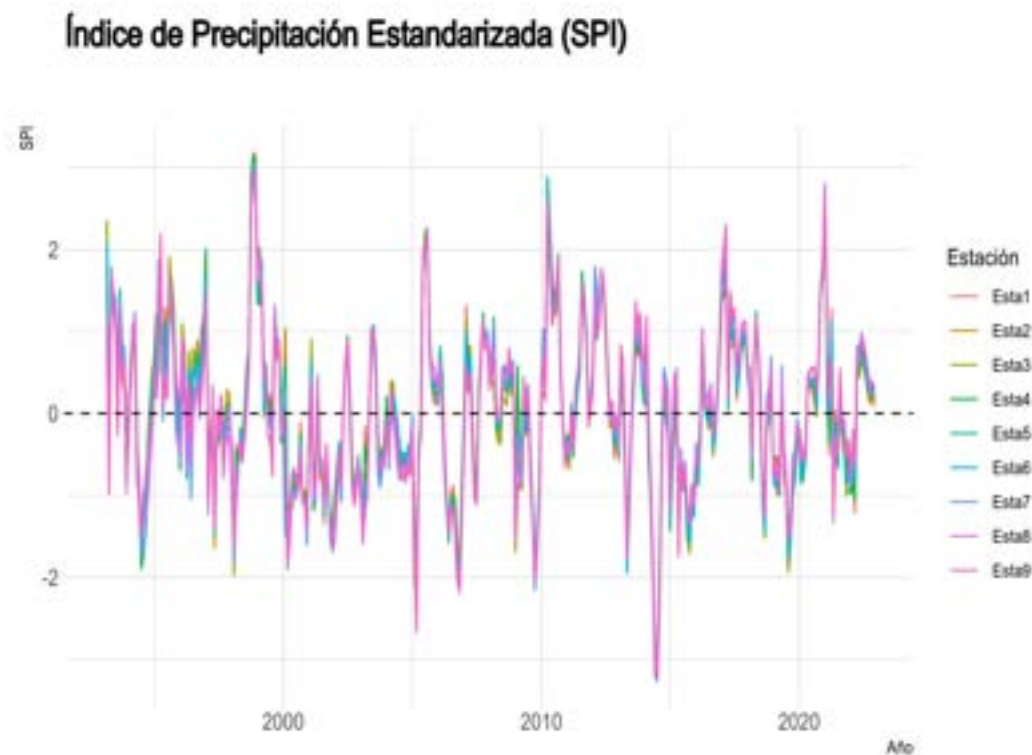


Al analizar la serie de tiempo, no se observa una tendencia de la precipitación en función del tiempo, ni a disminuir ni a aumentar. Esto indica que, la serie de tiempo presenta un comportamiento estacionario. Por su parte, el valor medio mensual de la serie de tiempo de cada estación va desde 103.4587 mm (estación 7) hasta 116.9101 mm (estación 3), es decir, la diferencia media entre una estación y otra es de aproximadamente 13.8083 mm.

La distribución a nivel espacial de la precipitación aumenta de oeste a este, esto tiene correspondencia no sólo en dicha variable sino también en aquellas que se derivan de estas, como lo son los periodos de retorno. Según Bonilla (2019), en la parte alta de la cuenca del Río Grande de Matagalpa, cuenca a la cual pertenece la Cállico, presenta periodos de retorno tanto para sequías moderadas como severas que aumentan de Oeste a Este (O-E) y a mayor altitud.

### Figura 3

Comportamiento del Índice de Precipitación Estandarizada de tres meses (SPI-3) de las estaciones analizadas



El comportamiento del Índice de Precipitación Estandarizada de tres meses en cada una de las estaciones virtuales se presenta en la Figura 3. Se identificaron durante el periodo analizado cuatro intensidades clasificadas como extremadamente seco en las estaciones 1, 2 y 3; cinco en las estaciones 4, 5 y 6, mientras hasta siete en las estaciones restantes.

Sin embargo, si se evalúa aquellas intensidades que persistieron en el tiempo por tres o más meses consecutivos en las estaciones, se observa que estas se concentran alrededor de un periodo (excepto en la estación 1), ocurridos la mayoría en época lluviosa del año 2014, donde se produjo una de las mayores sequías que ha azotado al país. Ante esto, es mayor la cantidad de eventos que no tienen una duración de tres meses que aquellos que sí lo tienen.

En este sentido, Zabaleta *et al.*, (2022) indica que se trata de eventos aislados o poco intensos que no representan en sí un evento de sequía, sin embargo, es posible que dichos eventos puedan evolucionar a través del tiempo aumentando su magnitud, convirtiéndose posiblemente en sequía.

Por otro lado, si se cuantifica las intensidades consideradas como severamente seco, aumenta notablemente el número en comparación con la anterior categoría, identificándose en las diferentes estaciones meses clasificadas con esta etiqueta entre 11 y 18 ocasiones. A pesar de ello, si se valora su duración, sólo las estaciones 2 y 3 presentan duraciones de al menos 3 meses consecutivos o más, la mayor parte de estas ocurrieron en el invierno del 2014 y 2015.

Dado que se eligió el SPI-3 esto implica que cualquier evento categorizado como severa o extremadamente seco tiene repercusión directa sobre la agricultura de acuerdo con lo indicado por la OMM, (2012). Esto se corrobora con lo presentado por Rodríguez, (2014), el cual trasciende a tópicos de salud pública relacionado con la seguridad alimentaria.

Finalmente, si se valora su magnitud, el promedio en las estaciones es de -7.37 para eventos extremos secos, mientras es de -1.65 para eventos severamente secos, es decir, a pesar de que hay una mayor cantidad de eventos severamente seco, son los extremos secos los que han producido el mayor daño, particularmente en la agricultura.

## **Conclusiones**

La precipitación de las estaciones valoradas presenta un comportamiento estacionario a lo largo del tiempo, mientras a nivel espacial, aumenta levemente de oeste a este, lo a que a su vez repercute sobre otras variables que se derivan sobre esta variable tales como los periodos de retorno.

Las intensidades clasificadas como extremadamente seco son menos recurrentes que aquellas clasificadas como severamente seco, sin embargo, las primeras presentan mayor duración en el tiempo y, por ende, su magnitud aumenta, lo que se traduce en una exacerbación del fenómeno en la región, particularmente sobre las actividades agropecuarias.

## Bibliografía

- Beguiría, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2023). SPEI: *Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (1.8.1)*. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>.
- Below, R., Grover-Kopec, E., & Dilley, M. (2007). Documenting Drought-Related Disasters: A Global Reassessment. *The Journal of Environment & Development*, 16(3), 328–344. <https://doi.org/10.1177/1070496507306222>
- Bernstein, L., Bosch, P., & Change, (IPCC) Intergovernmental Panel on Climate. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- Bonilla Escoto, H. J. (2019). *Análisis regional de frecuencia para la generación de mapas de retorno de sequía en la subcuenca parte alta del Río Grande de Matagalpa*. *Revista Científica Agua y Conocimiento*, 5, 1–14. <https://revistacira.unan.edu.ni/index.php/AyC/article/view/86>
- Crespo, G. (2008). *Sequía*. Colegio de Postgraduados de Puebla (COLPOS).
- Dragovic, R. (1997). Circunstancias que conducen a una sequía. Miliarium Aureum S.L.
- García Rodríguez, E. J., & Miranda Blandón, J. D. (2015). *Desarrollo a Escala Humana y Resiliencia en las comunidades asociados a la Unión de Campesinos Organizados de San Dionisio (UCOSD)* [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN)]. <https://repositorio.unan.edu.ni/6402/1/6328.pdf>
- Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE) (Ed.). (2008). *San Dionisio en cifras*. Gobierno de la República de Nicaragua. <https://www.inide.gob.ni/docu/censos2005/CifrasMun/Matagalpa/San%20Dionisio.pdf>
- Núñez López, D., Muñoz Robles, C., Reyes Gómez, V., Velasco Velasco, I., & Gadsden Esparza, H. (2007). *Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México*. 41(3), 253–262. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30241301.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). *Índice normalizado de precipitación - Guía del usuario*. Organización Meteorológica Mundial (OMM). <https://www.>

droughtmanagement.info/literature/WMO\_standardized\_precipitation\_index\_user\_guide\_es\_2012.pdf

- Rodríguez, V. (2014). *Diagnóstico de inseguridad alimentaria causado por el efecto del fenómeno del Niño en la época de primera 2014 en los municipios de Esquipulas y San Dionisio - Nicaragua*. Christian AID. <https://reliefweb.int/report/nicaragua/diagn-stico-de-inseguridad-alimentaria-causado-por-el-efecto-del-fen-meno-del-ni-o>
- Ruiz Álvarez, V. (2020). *Estimación del Impacto del Cambio Global sobre el Riesgo de Sequía en el Sureste de España: Evaluación y Pronóstico sobre los Recursos Hídricos y el Uso del Agua* [Tesis doctoral]. Universidad de Murcia.
- Valiente, O. (2001). *Sequías, tipologías y métodos de cuantificación*. Redalyc.
- Zabaleta Ortega, Á. J., Nobles Orozco, E., Mercado Fernández, T., & Díaz Carvajal, Á. (2022). *Evaluación de amenaza por sequía en el departamento de Córdoba, Colombia*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 21(40). <https://doi.org/10.22395/rium.v21n40a6>

# **APORTACIÓN PARA EL ODS 6: DESARROLLO DE SISTEMAS PARA EL SANEAMIENTO Y REÚSO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE HUMEDALES CONSTRUIDOS EN ZONAS RURALES EN EL OCCIDENTE DE MÉXICO**

Aldo Antonio Castañeda Villanueva

## **Resumen**

La continua demanda global de recursos naturales como el agua, ocasionada entre otros factores por el crecimiento de los centros de población humana, la deficiente gestión de las fuentes de suministro y limitantes en el tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas, acentúan la actual crisis hídrica poniendo en riesgo el equilibrio ambiental en cada vez más regiones del planeta. En México se reporta que menos de la tercera parte de las aguas residuales generadas reciben alguna forma de saneamiento (CONAGUA, 2021), por lo que constantemente volúmenes considerables de aguas residuales son descargadas a cuerpos de aguas superficiales provocando su continua contaminación y severos riesgos para la salud de la población. En el presente estudio se evalúan sistemas alternativos de saneamiento de aguas residuales domesticas mediante Humedales Construidos (HC) en el área rural, como estrategia reproducible para disminuir la contaminación de cuerpos de agua superficiales y contribuir con el cumplimiento de proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua (ODS 6). Los HC son sistemas pasivos de tratamiento que consisten en lagunas o canales de poca profundidad, con especímenes de plantas donde actúan mecanismos físicos, químicos y biológicos. Los resultados en siete



HC ubicados en los estados de Jalisco y Michoacán muestran reducciones significativas mayores al 96% en parámetros evaluados como: Demanda química de oxígeno, Conductividad específica, Nitrógeno total y Fósforo total. La adecuada incorporación de sistemas alternativos como los HC puede contribuir con el mejoramiento ambiental y el desarrollo humano, social y económico de poblaciones rurales.

**Palabras clave:** humedales artificiales, poblaciones rurales, tratamiento de aguas.

## **Introducción**

Los sistemas para el saneamiento y la reutilización de efluentes domésticos, mediante Humedales Construidos (HC) son sistemas pasivos de tratamiento constituidos básicamente por canales, estanques y/o lagunas con profundidades efectivas máximas de 80 cm, con sustratos y especímenes de vegetación propias de zonas húmedas principalmente macrófitos y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos, estos sistemas también se utilizan para restaurar ecosistemas y para la biorremediación de suelos contaminados.

Considerando la meta del ODS 6 sobre “agua limpia y saneamiento”, que básicamente pretende establecer estrategias que garanticen la disponibilidad del agua, su gestión sostenible y el adecuado saneamiento para todos, el presente estudio tiene por objetivo evaluar sistema de saneamiento y reúso de aguas residuales de origen doméstico, mediante humedales construidos en regiones rurales de los estados Jalisco y Michoacán.

## **Marco conceptual**

Los HC más comunes en el tratamiento de aguas residuales de carácter doméstico a nivel rural y semiurbano son principalmente de dos tipos:

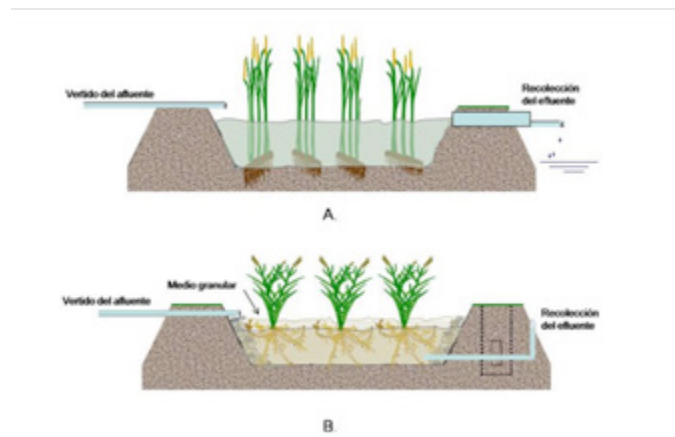
- 1) De flujo superficial: en estos el agua en tratamiento se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y raíces de las plantas, simplícidamente este tipo de HC consisten en lagunas de tratamiento convencionales adecuadas con menor profundidad (no mayor a los 40 cm) y cierto tipo de vegetación (acuática, micrófitos)

2) De flujo subsuperficial: en este tipo de HC la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular (sustrato poroso) y las raíces de las plantas (macrófitos principalmente), con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 60 cm y en (Figura 1), este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así pues, los HC de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación, mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua, por ejemplo, como en las lagunas de oxidación (Kadlec et al., 2000).

Los HC de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales; los de flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes (Vymazal y Masa, 2003).

### Figura 1

*Tipos de HC para el tratamiento de aguas: A) Superficial y B) Subsuperficial*



Fuente: Estopá, 2018.

Los de flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren

propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente. Los principales inconvenientes de los HC frente a los sistemas convencionales son:

- Requieren una superficie netamente superior; entre 20 y 80 veces más área superficial que los sistemas mecanizados de tratamiento (Collado, 2000).
- Costo de construcción similar, o incluso mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra. La necesidad de equipos en instalaciones convencionales se ve compensada por los grandes movimientos de tierra que se precisan en sistemas de humedales, es necesario estudiar cada proyecto en particular (García et al, 2004).
- Larga puesta en marcha. Desde algunos meses o un año en sistemas con flujo subsuperficial hasta varios años en sistemas con flujo superficial (Kadlec et al., 2000), ya que dependen principalmente de las condiciones climatológicas.
- Difíciles de diseñar bien dado el alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes. No hay un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño.

Por otra parte, los macrófitos son vegetales que pueden vivir en zonas y suelos inundados ya sea permanentemente o bien durante largos períodos de tiempo, también son conocidas como plantas palustres (Figura 2).

## **Figura 2**

*Sistema radicular de macrófitos en flotación*



Fuente: Pérez, 2004.

Este tipo de vegetación, según su morfología y fisiología, puede clasificarse de diferentes formas; dependiendo de la forma en que se sujetan al sustrato o suelo, en este caso se tienen:

- 1) Macrófitos emergentes, son generalmente plantas perennes con órganos reproductores aéreos, que viven en suelos anegados de forma permanente o temporal.
- 2) Macrófitos de hojas flotantes, son principalmente angiospermas, sus órganos reproductores son flotantes o aéreos y viven sobre suelos anegados.
- 3) Macrófitos sumergidas, las cuales en su mayoría son variedades de helechos y musgos entre otros, conteniendo a las angiospermas. Este tipo de plantas se encuentran en toda la zona a la cual llega la luz solar y no suelen vivir (las angiospermas vasculares) más allá de los 10 m de profundidad aproximadamente. Sus órganos reproductores suelen ser o bien aéreos, flotantes o sumergidos (Robusté, 2004).

En general, son especímenes vegetales que dependiendo del nivel nutricional del medio donde se encuentren y las condiciones climatológicas, puede alcanzar alturas y volúmenes (biomasa) considerables: Entre los 30 y 120 cm en el caso de los juncos, de 60 a 130 cm en los esparganios, entre 120 y los 240 cm en las enneas y de 160 a 320 cm en los carrizos. Aunque es probable que se trate de formas macroscópicas de vegetación acuática, en estos sectores no se suelen englobar, asociados a macrófitos, a grupos como las macroalgas, las pteridofitas (musgos, helechos) adaptados a la vida acuática, sino más bien a un amplio grupo de plantas angiospermas. Así mismo, existen macrófitos flotantes las cuales comprenden un amplio y variado grupo de plantas, destacándose para depuración de efluentes: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), salvinia (*Salvinia* spp.), redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*) y lentejas de agua (*Lemna* spp., *Spirodella* spp.) (Robusté, 2004; García 2003).

La biorremediación con macrófitos se define como el proceso para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural, mediante este mecanismo es posible disminuir la concentración de contaminantes específicos del suelo. Por otro lado, la fitodepuración, es la técnica de purificación caracterizada por tratamientos de tipo biológicos, en el cual las plantas, creciendo en agua saturada de nutrientes, desarrollan un papel clave y directo sobre las bacterias que colonizan el sistema de raíces y el rizoma.

El filtro verde se basa en la utilización de macrófitos emergentes, las cuales se suelen encontrar de forma natural enraizadas en el terreno, como son el caso de la Typha, Scirpus, Iris, Sparganium, entre otras. El método consiste que transformar su asiento natural con estructuras artificiales flotantes, al flotar, estas especies forman un tapiz denso de raíces y rizomas que ocupa todo el volumen del colector (laguna o canal), forzando para que toda el agua a tratar circule por la masa de sus sistemas radiculares, que soportan microorganismos que degradan la materia orgánica. Estos sistemas de filtros verdes con macrófitos en flotación permiten eliminar los elementos eutrofizantes, en especial el fósforo y el nitrógeno, además de metales pesados y fenoles.

En general los HC son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos, normalmente de menos de un metro, plantados con plantas propias de zonas húmedas (macrófitos acuáticos) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. En el caso de depuración de aguas residuales, dado que entre las adaptaciones que presentan estas especies, destaca su capacidad para trastocar oxígeno desde la parte aérea hasta las raíces, favorece el establecimiento de colonias de microorganismos que contribuyen a la eliminación de contaminantes, poseen capacidad de absorción de nitrógeno, fosforo y metales pesados, mejorando la calidad de las aguas.

Como ya se ha mencionado los HC para saneamiento de efluentes se clasifican en dos, según la circulación del agua en ellos: Superficial y subterránea o subsuperficial, en los de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos, es una variante del sistema de tratamiento tipo laguna o estanque convencional, con profundidad máximas de 50 cm. En los HC de flujo sub-superficial la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular, con una profundidad del agua de aproximadamente 60 cm y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos, este tipo es una adecuación de los sistemas convencionales de infiltración y percolación en suelos (Rousseau et al., 2004).

## **Materiales y métodos**

En México, para medir el grado de contaminación de las aguas residuales se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente contenidas principalmente

en las normas oficiales mexicanas; NOM-001-SEMARNAT-1996, “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1996a), NOM-002-SEMARNAT-1996, “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1996b) y NOM-003-SEMARNAT-1997, “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (DOF, 1997).

Entre los parámetros más comunes que se cuantifican para evaluar el funcionamiento de los HC se encuentran:

- 1) La Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg/L O<sub>2</sub> y en su valor numérico incluye a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), cuyo valor regularmente es menor.
- 2) El Nitrógeno total (Nt): Es un indicador utilizado en ingeniería ambiental, refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, entre otros) y el ion amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. En plantas tratadoras de aguas residuales, se mide el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y que posteriormente puede ser desnitrificado a nitrógeno gaseoso. Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales, su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes en un ecosistema acuático). El nitrógeno se presenta en diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas.
- 3) El Fósforo total (Pt): Se encuentra en las aguas naturales y aguas servidas casi exclusivamente en forma de fosfatos, estos se clasifican a su vez en: orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta- y poli fosfatos) y fosfatos orgánicamente ligados, la determinación del fosfato total incluye dos pasos: El primero consiste en la conversión a orto-fosfato disuelto, todas las diferentes formas del fósforo presente incluyendo el fósforo reactivo, el hidrolizable y el orgánico, el segundo paso consiste en la detección del orto-fosfato en solución por algún método cuantitativo, por ejemplo colorimetría con longitudes de onda entre 400 y 470 nanómetros (nm).

El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida y su exceso en el agua provoca también eutrofización.

- 4) Conductividad específica o eléctrica (CE): Es la medida de las cargas iónicas que circulan dentro del agua, esta medida nos ofrece información general de la concentración de sales e iones presentes en el agua. Los iones más habituales hallados en las aguas naturales son: sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Sus concentraciones presentan fuertes oscilaciones, desde bajas concentraciones en los ríos de alta montaña, hasta casos de mayor concentración (agua de mar). También es un factor importante para detección de fuentes de contaminación, para la evaluación del comportamiento del agua para riego y para la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de aguas pueden aumentar su conductividad específica o eléctrica. La unidad básica para medir la CE son los miliSiemens por centímetro (mS/cm) o microSiemens por centímetro ( $\mu\text{S/cm}$ ).

Tanto para la recolección de las muestras de agua, como para las determinaciones analíticas en el laboratorio, se observaron los procedimientos y técnicas contenidas en la normatividad ambiental oficial vigente en México (DOF, 1996a, b, 1997), que contempla las técnicas establecidas por el manual de métodos estándar para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 2017), utilizando los siguientes métodos y equipos:

- 1) Fotómetro marca Hach modelo DR 2800. Es un espectrofotómetro de espectro visible, con un rango de longitud de onda de 340 nm a 900 nm, programado y calibrado según especificaciones del fabricante para: DQO, Nt, y Pt.
- 2) Reactor digital marca Hach modelo DRB200, para digestión de muestras de agua residual (DQO, Pt y Nt).
- 3) Medidor portátil marca Hach modelo SensION+ EC5 para CE.

### *Zonas de estudio*

La zona de estudio del presente trabajo consistió en dos localizaciones que disponen actualmente con sistemas de saneamiento y reúso de aguas residuales domésticas mediante HC: La primera comprende dos poblaciones que se encuentra en la región Altos

del estado de Jalisco: 1) Ojo Zarco (OZ) ubicada en el municipio de Jesús María y, 2) Martínez Valadez (MV) en el municipio de Arandas (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Poblaciones rurales en los Altos de Jalisco, con HC*

<b>Población</b>	<b>Clave</b>	<b>Habitantes</b> (diseño tratamiento)	<b>Capacidad</b> (litros por segundo)
Ojo Zarco	OZ	900	0.65
Martínez Valadez	MV	750	0.50

En ambos casos el sistema de tratamiento está formado por:

- 1) Pre-tratamiento: Un sistema para la desarenación de las aguas residuales, en el que se separan tanto materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, etc.) por flotación, como pesados (metales, arenas, etc.) por sedimentación, construido en mampostería.
- 2) Tratamiento: Conformado por el propio HC que, para el caso de OZ, utiliza grava de varias dimensiones (0.6 a 3.8 cm, porosidad del 40%) como sustrato y especímenes de gladiolo (*Gladiolus* spp.), como especímenes para el tratamiento. Por su lado, el de MV dispone de tezontle (1 a 2 cm, porosidad 60 %) como sustrato y principalmente lirio acuático (*Eichhornia crassipes*).
- 3) Post-tratamiento: En el caso de OZ (Figura 3) se dispone de una laguna de oxidación con tule (*Typha latifolia*) y para el de MV (Figura 4) una laguna facultativa sin vegetación.

Los tiempos de residencia hidráulica de los sistemas de tratamiento evaluados fueron de 3 a 4 días, la temperatura promedio fue de 21°C, con humedades relativas promedio del 50%.



**Figura 3**

*HC en Ojo Zarco (OZ), municipio de Jesús María, Jalisco, México*



**Figura 4**

*HC en Martínez Valadez (MV), municipio de Arandas, Jalisco, México*



La segunda localización comprende cinco poblaciones ubicadas sobre la ribera del lago de Pátzcuaro en Michoacán, en la Tabla 2 se muestra las características de estos sistemas de saneamiento.

**Tabla 2**

*Poblaciones rurales con HC en la ribera del Lago de Pátzcuaro, Michoacán*

<b>Población</b>	<b>Clave</b>	<b>Habitantes (diseño tratamiento)</b>	<b>Capacidad (litros por segundo)</b>
Cucuchucho	C	1,080	0.50
Santa Fe de la Laguna	SFL	2,500	3.00
San Jerónimo	SJP	950	0.50
Purenchécuaro			
Erongarícuaro	E	2,900	3.33
San Francisco	SFU	450	0.35
Uricho			

Estos sistemas de tratamiento están formados principalmente por:

- A) Pretratamiento: Sistema para la desarenación de las aguas residuales crudas, en el que se separan tanto materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, etc.) por flotación, como pesados (metales, arenas, etc..) por sedimentación.
- B) Tratamiento: Celdas con macrofitos. Plantas: Carrizo común (*Phragmites australis*), alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) y tule (*Typha latifolia*).
- C) Post-tratamiento: Mediante lagunas de maduración y/o humedales de pulimiento (Figura 5).

**Figura 5**

*Sistema de tratamiento para las aguas residuales de Erongarícuaro (E), en Michoacán, México*



El agua tratada proveniente de estos cinco sistemas de tratamiento, se descarga directamente al lago de Pátzcuaro. Los muestreos y análisis de laboratorio se realizaron en la temporada de estiaje, de noviembre del 2020 a marzo del 2021.

## Resultados y discusión

Los resultados de las determinaciones paramétricas tanto a la entrada como a la salida de cada HC, así como el porcentaje de reducción correspondiente, se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Resultados de las evaluaciones paramétricas y porcentajes de reducción en los HC evaluados*

Población/ Parámetro (unidad)	DQO (mg/L)			Nt (mg/L)			Pt (mg/L)			CE (µS/cm)		
	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R	E	S	%R
OZ	396	237	40.11	91	27	70.21	42.8	16.9	60.50	843	152	82.01
MV	413	82	80.12	82	12	85.02	43.1	8.8	79.62	895	90	90.03
C	1654	281	83.01	134	68	49.25	23.6	14.8	37.29	1494	137	90.83
SFL	1776	65	96.34	154	55	64.29	21.8	11.3	48.16	1460	187	87.20
SJP	1689	88	94.79	154	61	60.39	18.9	6.7	64.55	1739	195	88.79
E	1378	125	90.93	138	60	56.52	18.7	11.3	39.57	2750	319	88.40
SFU	1675	275	83.58	147	75	48.98	22.4	15.3	31.71	1864	216	88.41
Referencia (NOM)	<b>120</b>			<b>15</b>			<b>5</b>			<b>250</b>		

Nota: E= entrada, S= salida, %R= Porcentaje de reducción.

Las mayores reducciones de los parámetros cuantificados fueron; para DQO del 40.11% (OZ) hasta el 96.34% (SFL), para Nt de 48.98% (SFU) hasta el 85.02% (MV), para Pt de 31.71% (SFU) hasta el 79.62% (MV) y para la CE de 82.01% (OZ) hasta el 90.83% (C), la operación más efectiva resultó los sistemas de MV (Jalisco) y SJP (Michoacán), los que presentan menos efectividad fueron los de OZ (Jalisco) y los de C y SFU (Michoacán).

Referente al cumplimiento con la normatividad oficial vigente, la mayoría de los sistemas de saneamiento evaluados exceden los límites máximos permisibles para Pt, Nt y CE. Los que se aproximan más al cumplimiento de la normatividad son MV y SJP.

Se observó durante el desarrollo de este estudio falta de mantenimiento preventivo y correctivo, principalmente en los pre-tratamientos (desarenadores) de los siete sistemas de tratamiento, lo que provocó las condiciones no adecuadas en la descarga de las aguas tratadas y la falta de cumplimiento con la normatividad oficial, aunque las reducciones de los parámetros evaluados son importantes (Castañeda, 2020).

## **Conclusiones**

Comparando con las plantas convencionales de tratamiento de aguas, los sistemas para el saneamiento de aguas residuales domésticas mediante HC, presentan ventajas tales como menores costos de instalación, operación y mantenimiento; requieren menor consumo de energía, insumos químicos y mano de obra especializada, por lo que estos pueden ser una alternativa económicamente viable y ambientalmente sustentable, principalmente para poblaciones rurales que dispongan de terrenos adecuados y condiciones climatológicas favorables. Es de importancia recalcar que, aunque el mantenimiento de estos sistemas alternativos es considerablemente menor al de los tratamientos convencionales, es necesario realizarlo regularmente principalmente extrayendo los sedimentos y material flotante en los pre-tratamientos, así como retirar periódicamente la biomasa y vegetación excesiva en las celdas de los humedales para evitar cortos circuitos en el flujo del agua, asegurando los periodos de contacto adecuados. En general, estos tratamientos alternativos para aguas residuales domésticas contribuyen de manera sostenible con la ODS 6 principalmente para lugares con problemas de contaminación efluentes domésticos sin tratamiento y escasos recursos técnicos y económicos.

## **Bibliografía**

- APHA. 2017. Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater. American Public Health Association. Washington, Estados Unidos.
- Castañeda, A. 2020. Evaluación de humedales construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). Revista Latinoamericana del Ambiente y las Ciencias (BUAP, México). 11: 45-67.

- CONAGUA 2021. Estadísticas del Agua en México, edición 2021. Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del Agua (SINA). Comisión Nacional del Agua. En <https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>
- Collado, N. 2000. Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.
- DOF. 1997. NOM-003-ECOL-1997. “Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”. En: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0)
- DOF. 1996a. NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0)
- DOF. 1996b. NOM-002-SEMARNAT-1996. “Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal”. En: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0)
- Estopá, S. 2018. Comparativo y dimensionamiento básico de diversas tipologías de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del polígono industrial Moncada III (Valencia). Trabajo de fin de grado. Universitat Politècnica de Valencia. España.
- García, J. 2003. Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In: The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands. 1st International Seminar. Dias, V., Vymazal, J., eds. Instituto Nacional da Água, Pp. 497-520. Lisboa, Portugal.
- García, J., Ojeda, E., Sales, E., Chico, F., Píriz, T., Aguirre, P., Mujeriego, R. 2003. Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.* 21: 129-142.
- García, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L., Bayona, J.M. 2004. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.* 38(7): 1669-1678.

- Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. Treatment Wetlands. CRC Press, 893 pp. Florida, Estados Unidos.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Haberl, R. 2000. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp. Londres, Reino Unido.
- Pérez, M. 2004. Regeneración de aguas residuales mediante macrofitas en flotación. Facultad de Ciencias Ambientales. Universitat de València. España. En <https://docplayer.es/63425939-Regeneracion-de-aguas-residuales-mediante-macrofitas-en-flotacion.html>.
- Robusté, J. 2004. Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. In: Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. García, J., Morató, J., Bayona, J.M., eds. Universidad Politécnica de Catalunya, pp. 15-21. Barcelona, España.
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P., De Pauw, N. 2004. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: A review. *Wat. Res.* 38(6): 1483-1493.
- Vymazal, J., Masa, M. 2003. Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.* 48(5): 143-148.

# **GESTIÓN DE RECARGA DE ACUÍFEROS (MAR) VS DESALINIZACIÓN; LA BÚSQUEDA DE ALTERNATIVAS SOSTENIBLES. CASO DE ESTUDIO BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO**

Miguel Angel Imaz-Lamadrid

Jobst Wurl

María Z. Flores-López

Pablo Hernández-Morales

## **Resumen**

En zonas áridas como Baja California Sur (BCS), los requerimientos de agua para abastecer a la población y satisfacer la demanda del sector industrial son cada vez más altos, lo que está provocando una sobre explotación de los acuíferos y por ende reduciendo la capacidad de los organismos operados para suministrar el recurso hídrico. En zonas remotas del estado y en la región de Los Cabos se han instalado desaladoras como una forma de obtener de forma rápida un caudal constante adicional para suministro. En otras partes del estado como lo es la ciudad de La Paz, se han polarizado las opiniones referentes a la instalación de una desaladora esto debido a problemáticas económicas, ambientales y energéticas que particularmente presenta la ciudad. Por otro lado, se ha propuesto una estrategia ambientalmente más amigable como son las obras hidráulicas cuyo principal problema es que no aportarían un caudal constante por su dependencia con el clima. En este contexto, el presente trabajo analiza los beneficios e impactos de

ambas propuestas considerando aspectos hidrológicos, ambientales y económicos y en el contexto de las proyecciones de cambio climático esperadas para la entidad.

**Palabras clave:** Recarga acuíferos, desalinización, presas.

## **Introducción**

En Baja California Sur (BCS), el clima tiende a ser seco y cálido en gran parte del territorio; especialmente en las zonas bajas, mientras que en la zona serrana los climas pueden ir desde seco cálido-semicálido a templado. La precipitación media anual ronda los 100-300 mm/año en gran parte del territorio. (Ivanova-Boncheva y Gámez-Vázquez, 2012; Romero-Vadillo y Romero-Vadillo, 2016). Las mayores precipitaciones ocurren en verano y como resultado de la aproximación de ciclones tropicales (Cruz-Falcón et al. 2011; Wurl e Imaz-Lamadrid, 2016), por lo que suelen ser de corta duración y alta intensidad (Imaz-Lamadrid et al. 2019). Por sus condiciones climáticas y posición geográfica, Baja California Sur es propenso a sufrir sequías (Troyo-Diéguéz et al. 2013). Dada la enorme importancia que tiene el agua para los ciclos sociales y ecológicos en el estado de Baja California Sur, es conveniente considerar a la lluvia como un agente determinante (Z. Flores et al. 2015).

En el estado, no se tiene fuentes de aprovechamiento hídrico superficial, salvo en los oasis donde bajos volúmenes se aprovechan por los locales para consumo y/o actividad agrícola tradicional. En este sentido el mayor volumen de agua se extrae de los acuíferos la mayoría de ellos sobre explotados (CONAGUA, 2022).

En este sentido y a lo largo de los últimos años se han planteado diversas estrategias para poder satisfacer la demanda actual y futura en los acuíferos Valle de Santo Domingo, La Paz y San José del Cabo, en los cuales se concentra la mayor proporción de población en el estado, así como el mayor desarrollo industrial. Dentro de las propuestas mencionadas se encuentran: Cosecha de agua en edificaciones, atrapanieblas, recuperación del condensado de aires acondicionados, reducción de extracciones, infiltración de aguas residuales tratadas, mejoramiento del sistema de distribución (por fugas en el sistema), instalación de presas de almacenamiento y recarga y la instalación de desaladoras. De todas estas, las dos últimas son las que más discusión han generado en cuanto a su factibilidad desde un punto de vista hidrológico, ambiental y económico. Ante la



polarización que se observa respecto a este tema, en este artículo se tiene como objetivo analizar de manera integral la situación hídrica en el parte sur de Baja California Sur, así como los beneficios e impactos que la construcción de obras hidráulicas e instalación de desalinizadoras pudieran aportar al tema de la escasez de agua.

## **Marco teórico**

### *Caracterización del área de estudio*

La población total de BCS, alcanzó casi 800,000 habitantes en 2020, de los cuales el 44% radican en el municipio de Los Cabos 44.0%, 36.6% en La Paz, 9.1% en Comondú, 8% en Mulegé y 2.3% en Loreto (INEGI 2021). En el estado existen 416 establecimientos de hotelería con la llegada de 2,152,136 turistas al año, de los cuales el 66.1% vienen de extranjero (SECTUR, 2018). Si bien es cierto la industria turística está presente en todos los municipios de la entidad, en el municipio de Los Cabos es la principal actividad económica gracias a sus atractivos turísticos y condiciones para su desarrollo.

En la entidad la existencia de corrientes superficiales permanentes es casi nula, presentándose principalmente en época de. Cuenta con 42 cuencas hidrológicas, de las cuales cuatro están compartidas con el estado de Baja California. Las cuencas más importantes, en cuanto a volumen de escurrimiento natural superficial, son Bramonas y San Ignacio.

De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) en el año 2016, el volumen de extracción anual de aguas subterráneas fue de 386,332,282 m<sup>3</sup> y 37,470,211 m<sup>3</sup> por aguas superficiales. A nivel estatal el principal usuario del agua es el sector agrícola con 76% del volumen concesionado, seguido del abastecimiento público-urbano y doméstico con 15%, el de servicios con 5%, el pecuario con 2% y otros como la industria con 2%. Se estima que el consumo promedio, es de 150 a 200 litros de agua por habitante al día. En cuanto a la calidad del agua, se conoce que 10 acuíferos presentan contaminación por intrusión marina, lo que disminuye su potencial utilización. Sin embargo, existen otras adversidades, principalmente por la adición de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Cr) o exceso de nutrientes, derivados del uso de fertilizantes en los acuíferos de Santo Domingo y Vizcaíno, por mencionar algunos (Wurl et al., 2017). Además, acuíferos como

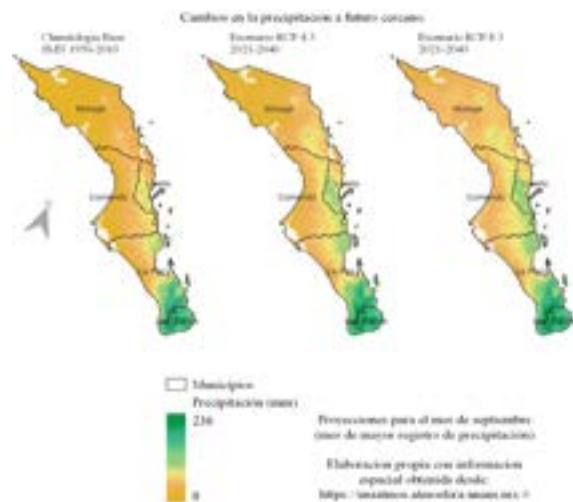
el de San Juan de los Planes o el de El Carrizal, presentan concentración de Arsénico en mayor valor a lo que indica la NOM-127-SSA1-2021 (Alvarado-Zambrano y Green-Ruiz, 2019; Velázquez-Pedroza et al., 2017).

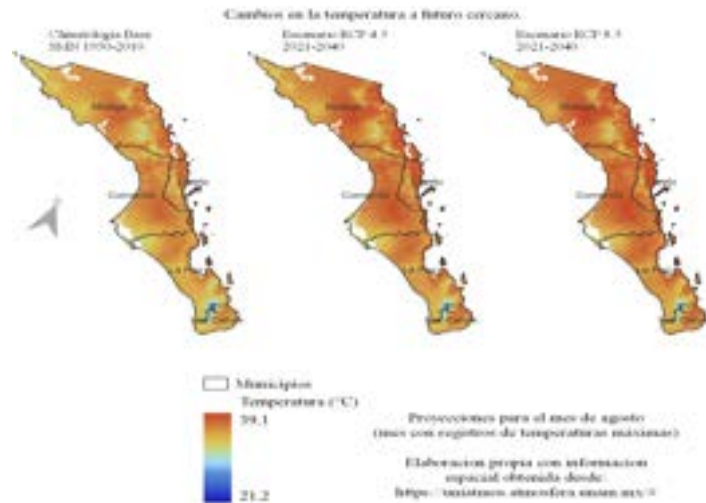
### *Escenarios de Cambio Climáticos en BCS*

De acuerdo con el modelo CORDEX Ar6 elaborado con base en la información climática de diferentes modelos climáticos globales (Fernández et al., 2022), se espera un aumento de la temperatura entre 0.7 y 1.2°C para el año 2040 bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5. En cuanto a las precipitaciones, para el escenario RCP 4.5 se observan incrementos de 20mm en los municipios de Los Cabos y La Paz, 10mm para Comondú y Loreto y una reducción del 10% en Mulegé. Bajo el escenario RCP 8.5, el aumento de precipitación para los municipios de La Paz y Los Cabos alcanzarían 12mm, lo que resultaría inferior a lo pronosticado bajo RCP 4.5. En contraparte, los municipios de Comondú, Loreto y Mulegé, registrarían aumentos entre 20 y 30mm (UNAM, 2023) (Figura 1).

### **Figura 1**

*Proyecciones de cambio climático para Baja California Sur de acuerdo con el modelo CORDEX AR6*





Fuente: Datos de UNAM (2023).

## Metodología

El análisis presentado en este trabajo se basó en una la revisión bibliográfica para lo cual se utilizaron los buscadores online disponibles. Se encontraron 32 trabajos los cuales fueron seleccionados para la realización de esta investigación considerando las siguientes temáticas y aspectos:

- a) Desalinización y recarga artificial. Se seleccionaron trabajos enfocados a estas temáticas. En el caso de la recarga artificial se dio prioridad a las obras hidráulicas.
- b) Ubicación geográfica del estudio. Se dio prioridad a aquellas investigaciones realizadas en BCS o en zonas aledañas. En el aspecto económico fue necesario considerar investigaciones enfocadas en otros países donde se ha realizado mayor desarrollo en el tema de la desalinización.

A partir de la información seleccionada se realizó un análisis comparativo para determinar los puntos favorables y negativos del proceso de desalinización y de la instalación de obras hidráulicas considerando las problemáticas que se presentan en BCS y desde la perspectiva de incremento de la disponibilidad per cápita con un enfoque sostenible y ambientalmente amigable.

## **Resultados**

### *Situación y problemáticas de las desalinizadoras en BCS*

La desalinización de agua de mar se ha venido desarrollando en BCS desde hace varias décadas y a distintas escalas. De acuerdo con datos de CEA-BCS (2015), se tienen registradas hasta el año 2015, un total de 12 plantas desaladoras. La mayor parte de estas atienden comunidades localizadas en zonas remotas del estado donde la obtención de agua de acuífero es complicada. En este sentido en el Municipio de Comondú se cuenta con 3 plantas con capacidad conjunta de 1.4 l/s, 1 planta en el Municipio de Loreto de 0.1 l/s de capacidad, 3 en el Municipio de La Paz con una capacidad conjunta de 4 l/s, destacando la planta ubicada en la población de La Ventana la cual genera 3.4 l/s, 4 en el Municipio de Mulegé con una capacidad conjunta de 3 l/s y finalmente 1 en el Municipio de Los Cabos la cual cuenta con una capacidad de 200 l/s (Bermúdez-Contreras et al., 2018). De acuerdo con el Plan Hídrico Regional 2021-2024 RHA 1, se espera la licitación de una segunda planta desaladora con capacidad de 250 l/s. De instalarse la nueva planta desaladora en el Municipio de Los Cabos, se tendría una capacidad total de 458 l/s posicionando al estado como el primer lugar en volumen de desalinización de agua de mar.

Aun cuando el proceso de desalinización representa una fuente adicional de agua potable, su operación ha generado inquietudes y opiniones divergentes a nivel mundial (Morote et al. 2014; Sánchez-Munguía, 2021). Los aspectos que más resaltan son: rechazo de salmueras al mar; emisiones de gases a la atmósfera como resultado del alto consumo de energía, dispersión de productos químicos, altos costos de operación y mantenimiento (Morote et al. 2014; Sánchez-Munguía, 2021).

De acuerdo con datos de Villar-García (2014) el costo de promedio de desalación en España es de 0.397 euros/m<sup>3</sup> (7.7 pesos mexicanos), incluyendo producción y mantenimiento, mientras que Arreguín-Cortés y Domínguez (2000), mencionan un costo de producción entre 0.57 y 3.68 dólares/m<sup>3</sup>. Si consideramos que de acuerdo con datos de SEMARNAT (2016), el suministro de agua per cápita en Baja California Sur es de 0.338 m<sup>3</sup> por día, esto nos daría un costo de \$2,467 pesos (costo definido por Villa-García (2014) ajustado a inflación anual del 2%) por persona al año. Así, una familia de 4 y 6 integrantes pudiera pagar en promedio entre 9,868 y 14,802 pesos mexicanos respectivamente.

Adicionalmente hay que considerar el capital que se requiere invertir para la instalación de una desaladora. La planta desaladora proyectada para Cabo San Lucas, tendrá un costo de 1,138 millones de pesos de acuerdo a un documento presentado en el portal Gob.mx.

En cuanto al uso energético y de acuerdo con Villar-García (2014), se requieren aproximadamente 2.9 kW para generar 1m<sup>3</sup> de agua desalinizada. Si consideramos el caudal diseño de la planta desalinizadora en Los Cabos equivalente a 200 l/s (0.2m<sup>3</sup>/s), obtenemos un consumo de electricidad de aproximadamente 10 MW/hora, lo que supone un importante requerimiento energético.

En el contexto ambiental, datos de De La Fuente et al. (2008) indican que las salmueras pueden alcanzar valores superiores a los 70,000 mg/l de Sólidos Disueltos Totales, casi el doble de los valores encontrados en el mar (35,000 a 45,000 mg/l). El impacto ambiental de la liberación de estas salmueras depende mucho del diseño del difusor (De La Fuente et al. 2008). En este sentido la pluma de dispersión puede ser observable desde escasos metros de la salida hasta varios kilómetros. En zonas con corrientes prevalecientes, la pluma salina tenderá a seguir la línea de costa y por ende aumentando la posibilidad de un impacto ambiental (Roberts et al. 2010; Vivanco, 2017).

### *Infraestructura hidráulica construida y proyectada en BCS*

#### Presas de Almacenamiento

En el estado se tienen instaladas 6 presas, dos en el municipio de Los Cabos (San Lázaro y La Palma), dos en el municipio de La Paz (Buena Mujer y Gral. Agustín Olachea Avilés) y dos en el municipio de Comondú (El Ihuagil y Alberto Andrés Alvarado Aramburo “La Higuera”). Las presas La Palma y Alberto Andrés Alvarado Aramburo son las presas de más reciente construcción, aumentando la capacidad total de retención a 53 millones de metros cúbicos.

Aunque el principal objetivo de una presa es la cobertura de una demanda, la mayoría de estas obras hidráulicas se construyeron con el objetivo de control de avenidas y en menor medida para la recarga de acuíferos. Una consideración relevante que ocurre en estas hidrotecnias es la acumulación de sedimentos.

En febrero de 2023, el agua almacenada en la presa de San Lázaro registra el mayor volumen de almacenamiento (91%) en las presas estatales con 5.19 Mm<sup>3</sup>. La presa que menor volumen de almacenamiento registra es la de Ihuagil con 0 Mm<sup>3</sup>.

### Obras de recarga

En el estado son pocas las obras hidráulicas que han sido planificadas y construidas para recarga artificial de agua, todas ellas a escala pequeña y construidas por particulares. De acuerdo con datos de Wurl e Imaz-Lamadrid (2017) e Imaz-Lamadrid et al. (2021), los arroyos tienen el potencial de infiltrar hasta un 20% del escurrimiento anual, dependiendo del volumen e intensidad de las lluvias, así como de la permeabilidad de los sedimentos. En el Valle de Santo Domingo, ubicado 200km al norte de la ciudad de La Paz, se realizó un estudio en el año 2010 para definir sitios adecuados para maximizar la infiltración de escurrimientos. Como parte de la estrategia se propuso un plan que incluía la reparación, adaptación y/o construcción de presas de almacenamiento en las partes altas de las cuencas que gradualmente liberarían el agua de sus embalses hacia las zonas bajas donde se propusieron obras de recarga, lo que generaría una infiltración de hasta 21.5 millones de m<sup>3</sup> anuales. En la ciudad de La Paz se han planteado obras de recarga (presas y pozas) así como la construcción de presas de almacenamiento adicionales como una medida para mitigar la sobreexplotación del acuífero, sin embargo y al día de hoy no se tiene conocimiento de estudios que valoren su potencial volumen de recarga.

### **Discusión**

#### *Valoración del potencial de almacenamiento e infiltración de escurrimientos en BCS*

El potencial de infiltración de las lluvias y escurrimientos ha sido atendido por académicos de distintas instituciones por lo menos en los últimos 10 años. De acuerdo con INEGI, el coeficiente de escurrimiento en el estado se encuentra entre 5 y 10% lo que implica que entre el 95 y 90% del agua se infiltra o se evapora. La tasa de infiltración durante eventos naturales ha sido definida en distintos acuíferos del estado entre 6 y 40% (Imaz-Lamadrid, 2021). En este sentido se estima que a nivel estatal se tiene un volumen de

escurrimientos no aprovechados (VENA) de 335.7 millones de m<sup>3</sup>, (ya considerando el volumen retenido en las presas del estado). Si se considera el déficit en disponibilidad de agua subterránea a nivel estatal, el cual alcanza 81.4 millones de m<sup>3</sup> (CONAGUA, 2022), claramente se puede apreciar que el VENA pudiera solventar el déficit en disponibilidad actual y aportar un volumen adicional para su aprovechamiento (tabla 1).

**Tabla 1**

*Estimación del volumen de escurrimiento anual no aprovechado a nivel municipal*

<b>Municipio</b>	<b>Precipitación media anual (mm/año)</b>	<b>Volumen de escurrimiento anual (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de escurrimiento anual infiltrado naturalmente (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen de escurrimiento anual no aprovechado (Mm<sup>3</sup>)</b>
La Paz	150	152	30	122
Los Cabos	300	56	11	46
Comondú	100	62	12	50
Mulegé	100	165	33	132
Loreto	220	53	10	43

\*Considerando un coeficiente de escurrimiento del 5% y una infiltración en los arroyos de 20%.

Si bien es cierto el potencial de aprovechamiento de los escurrimientos es alto, existen dos grandes problemáticas que dificultan la instalación de obras de recarga y almacenamiento. Por una parte, está el componente climatológico. En el estado, el mayor volumen de precipitación se presenta entre los meses de agosto a septiembre y está relacionado a la aproximación de ciclones tropicales. Debido a fenómenos climatológicos como el ENSO y la sequía, se pueden tener periodos de alta y baja frecuencia de ciclones tropicales, lo que afecta el volumen de precipitaciones y por ende el volumen de escurrimientos. Adicionalmente se tiene el problema de los altos costos de inversión que se requiere, especialmente en la construcción de presas de almacenamiento. De acuerdo con datos recopilados la construcción de las Presas La Higuera (Municipio de Comondú) y La Palma (Municipio de Los Cabos) tuvieron un costo de 340 y 280 millones respectivamente (Agua.Org, 2017). En el caso de las obras de recarga, se estima que el costo de una presa de gavión tendría un costo de \$1,353/m<sup>3</sup> mientras que una presa de concreto tendría un

costo de \$2,940/m<sup>3</sup> de acuerdo con datos de CONAFOR (2004) ajustados a la inflación anual nacional.

### *Pros y contras de la instalación de desalinizadoras a gran escala*

En el mar las afectaciones principales son por la toma de agua de mar para desalinización la cual absorbe conjuntamente organismos planctónicos, huevos de peces, larvas, etc., que posiblemente resultarán dañados o muertos al pasar por el sistema de filtros físicos de las bocas de succión. Durante la instalación de las tuberías en el fondo marino y la colocación de la torre de captación se genera una suspensión temporal de sólidos removidos desde el fondo (arena de mar) que puede afectar a algunos organismos marinos. La descarga directa al mar de la salmuera de rechazo, procedente de los procesos de desalación, forma una pluma de agua muy densa que por su mayor densidad fluye por gravedad sobre el fondo marino en la dirección de máxima pendiente.

A medida que avanza la salmuera va aumentando su ancho por esparcimiento lateral, disminuyendo consecuentemente su espesor, pero el grado de estratificación es tan grande entre ambas capas que hace que los procesos de intercambio y dilución sean muy lentos, aun cuando exista algo de corriente y oleaje. Por tanto, los vertidos de salmuera, cuyos sistemas de descarga no tengan una alta capacidad de dilución inicial, evolucionan en plumas con salinidades muy altas y por consiguiente se extienden sobre amplias extensiones, afectando a su paso a las comunidades bentónicas presentes.

Adicionalmente hay que considerar el impacto energético. El estado tiene una red propia de generación y distribución eléctrica que no está conectada a la red nacional, y que ha alcanzado su límite en varias ocasiones y especialmente en el verano cuando el requerimiento energético aumenta. Actualmente y con una capacidad de 937MW, la red de BCS es capaz de solventar los requerimientos energéticos; sin embargo, está generando una importante emisión de gases contaminantes a la atmósfera, situación que no solo es visible, sino que está siendo estudiada por académicos locales. La instalación de una desaladora supondría un importante aumento de la demanda y por consecuencia un mayor volumen de contaminantes a la atmosfera por aumento de la producción eléctrica. De acuerdo con datos de CERCA (2020), la concentración de SO<sub>2</sub> en la atmosfera se ha aumentado un 300% desde el 2018 y relacionan esta contaminante con la generación



de electricidad mediante generadores operados con combustóleo. Adicionalmente se encontraron valores por encima de la norma para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{O}_3$  (CERCA, 2020).

## Conclusiones

Las fuentes de abastecimiento de agua en el estado se encuentran actualmente comprometidas, debido a las condiciones de sobreexplotación de los acuíferos existentes, los cuales también están sobre concesionados. Las localidades de los municipios de Los Cabos y La Paz (particularmente la capital) se encuentran en una constante expansión a nivel poblacional, industrial y hotelera, por lo que es necesario desarrollar estrategias para conseguir el agua potable de forma oportuna y sostenible.

Ambas estrategias ofrecen ventajas y complejidades y debe evaluarse de forma detallada y puntual en que ciudades o regiones es prudente instalar desaladoras o en contra parte instalar otras medidas ambientalmente más amigables como son las obras de recarga que además reducen la exposición de las zonas urbanas al riesgo por inundación.

## Bibliografía

- Alvarado-Zambrano, D., & Green-Ruiz, C. R. (2019). Assessment of the Pollution Status and Human Health Risk in Soils from an Agricultural Valley in Northwest Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(9). doi:10.1007/s11270-019-4246-2
- Análisis Costo-Beneficio a nivel Pre-factibilidad para la “Construcción del proyecto de abastecimiento de agua en el bloque mediante desalación de agua de mar para el Municipio de Los Cabos, B.C.S.”. Tomado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/609546/6.\\_ACB\\_PLANTA\\_DESALADORA\\_CABOS\\_Ene\\_2020\\_-\\_enero\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/609546/6._ACB_PLANTA_DESALADORA_CABOS_Ene_2020_-_enero_2021.pdf)
- Arreguín-Cortés F y Domínguez, A. M. 2000. Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, 15(1):27-49
- Bermúdez-Contreras A., Thomson, M., Infield, D.G. 2008. Renewable energy powered desalination in Baja California Sur Mexico. *Desalination* 220(1-3). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.046>

- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2015a), “Actualización de la disponibilidad de agua en el Acuífero Cabo San Lucas (0317), Estado de Baja California Sur”. México, D.F., 31pp. [[http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR\\_0317.pdf](http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_0317.pdf) 07/12/2015].
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2015b), “Actualización de la disponibilidad de agua en el Acuífero San José del Cabo (0319), Estado de Baja California Sur”.- México, D.F., 31pp. [[http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR\\_0319.pdf](http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_0319.pdf) 07/12/2015].
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2021. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. 360p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2022. Programa Hídrico Regional 2021-2024 - Región Hidrológico-Administrativa I, Península de Baja California. 337p.
- Comisión Nacional del Agua. (sin año). Manifestación de Impacto Ambiental de la Planta Desaladora para las ciudades de Guaymas y Empalme, estado de Sonora. <https://desaladora.sonora.gob.mx/images/transparencia/anuencias/memoria-mia-obs-solv.pdf>
- Comisión Nacional Forestal. 2004. Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales. Manual de Obras Prácticas. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CG008969.pdf>
- Cruz-Falcón, A., Vázquez-González, R., Remírez-Hernández, J., Nava-Sánchez, E.H., Troyo-Diequez, E., Rivera-Rosas, J., Vega-Mayagoitia, J.E. 2011. Precipitación y recarga en la cuenca de La Paz, B.C.S, México. *Universidad y Ciencia*, 27(3).
- De La Fuente, J.A., Ovejero, M., Queralt, I. Gestión Medio Ambiental de salmueras en plantas de desalación marina. *Geo-temas*, 10.
- Fernández A, Castelán CI, Minero VO, Elizarrarás LG. 2022a. Escenarios de cambio climático regionalizados CORDEX, AR6, IPCC. <https://uniatmos.atmosfera.unam.mx/#> Consultado 02 marzo 2023
- Imaz-Lamadrid, M.A., Wurl, J., Ramos-Velázquez, E. 2019. Future of Coastal Lagoons in Arid Zones under Climate Change and Anthropogenic Pressure. A case study from San Jose Lagoon, Mexico. *Resources* 2019, 8(57): doi:10.3390/resources8010057.

- Imaz-Lamadrid, M.A., Gutiérrez-González, M.V., Gámez-Vázquez, A.E., Wurl., 2021. La gestión del agua en zonas áridas con actividad turística. El caso de Los Cabos y el acuífero San José del Cabo, Baja California Sur J - Impluvium, 21-26
- Ivanova-Boncheva, A., Gámez-Vázquez, A.E. 2012. Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur. UABCS, CICESE, CIBNOR, CICIMAR, SEMARNAT, INE, CONACYT, Gobierno del estado de Baja California Sur. 120p.
- Morote, Á. F., Rico, M., Enrique M. 2017. Critical Review of Desalination in Spain: A Resource for the Future?. Geographical Research, 55(4) pp. 1-12.
- OOMSAPASLC. (2019). Proyecto de Construcción, Operación, Mantenimiento y Puesta en Marcha de una Planta Desaladora en Cabo San Lucas, 224 pp.
- REPDA-CONAGUA. (2017). Registro público de derechos del Agua (REPDA)
- Roberts, D., Johnston, E., & Knott, N. (2010). Review: Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. Water research 44: 5117-5128
- Romero-Vadillo, E., y Romero-Vadillo, I.G. 2016. Estimación del riesgo en las Viviendas de Baja California Sur ante el impacto de ciclones tropicales. Teoría y Praxis, 2016, pp. 50-73
- Secretaría de Turismo, SECTUR. (2018). Programa Marco para Fomentar Acciones para Restablecer el Balance del Ciclo del Agua en Los Cabos <http://sistemas.sectur.gob.mx/dgots/03-los-cabos.pdf>
- Sánchez-Munguía, V. 2021. La desalinizadora de agua de mar en Playas de Rosarito. Un proyecto estratégico frente a la dependencia del Río Colorado y la escasez de agua en Baja California. Norteamérica, 15(1):1125-1128 <https://doi.org/10.22201/cisan.24487228e.2020.1.394>
- SEMARNAT. 2016. Agua suministrada al día por habitante. Tomado de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2016/archivos/01\\_agua/D3\\_AGUA07\\_06.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/archivos/01_agua/D3_AGUA07_06.pdf)
- Troyo-Diéguez, E., Mercado-Mancera, G., Cruz-Falcón, A., Nieto-Garibay, A., Valdéz-Cepeda, R., García-Hernandez, J.L., Murillo-Amador, B. 2013. Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha

- hídrica en Baja California Sur, Noroeste de México. *Investigaciones Geográficas*, UNAM, 85(2014), pp. 66-81. doi: 10.14350/rig.32404
- Universidad Nacional Autónoma de México. 2023. Atlas Climático Digital de México. Tomado de <https://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>. Acceso 03/03/2023
- Velázquez-Pedroza, K., Murillo-Jiménez, J. M., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Nava-Sánchez, E. H., Morales-Puente, P. A., Wurl, J., & Hernández-Pérez, E. (2019). Caracterización hidrogeoquímica en la cuenca hidrológica el carrizal, baja california sur, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(1), 47-64.
- Villa-García, A. 2014. El Coste Energético de la Desalación en el programa A.G.U.A. *Investigaciones Geográficas*, 62:101-112.
- Vivanco Font, E. 2017. Impacto Ambiental de Desalinización de agua del Mar. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 5p.
- Wurl, J. e Imaz-Lamadrid, M.A. (2016). The hydrogeological conditions in the San José del Cabo basin, Baja California Sur, México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 2016. Vol. 2 (2):91-102. <https://doi.org/10.18242/anpscripta.2016.02.02.02.0005>.
- Wurl, J., Imaz-Lamadrid, M.A., Méndez-Rodríguez, L., Acosta-Vargas, B. (2017). Arsenic concentration in the surface water of a former mining area. The La Junta Creek, Baja California Sur, México. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15(437). doi:10.3390/ijerph15030437
- Z. Flores M., Torrent J., López L. 2015. Ordenación y gestión integrada de cuencas hidrográficas con altos índices erosivos en el ámbito árido sudcaliforniano. Caso particular Cuenca de La Paz en Baja California Sur, México. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, Cuaderno No. 41. Publicación de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, ISSN: 1575-2410

# SPATIOTEMPORAL DATA FOR MANAGING DOMESTIC WASTEWATER

Néstor De la Paz-Ruíz

## **Abstract**

When climate change brings water scarcity scenarios, domestic wastewater (DW) use, and management represent a relevant alternative providing an additional water source. However, performing DW management activities requires DW data, usually missing and not provided with geographical and temporal details. This study proposes providing data on DW quality and quantity at neighborhood blocks with the support of water sensors, the Internet of Things (IoT), and statistical simulations. Watermeters and a spectrolyser are suggested to generate statistical information to estimate liters of DW and total suspended solids TSS (mg/l). Based on the DW statistical information, a simulation provides spatiotemporal DW data. The time series differences are discussed by comparing neighborhood blocks. The generated spatiotemporal data results are illustrated through maps and graphs of DW time series at neighborhood blocks showing significant differences of DW in liters and pollutants concentration (TSS). The alternative of providing data to quantify the production of DW pollutants is discussed, which is essential for the decision-making process of DW management strategies. It is concluded that using IoT technologies and modeling for generating, collecting, processing, and preserving spatiotemporal DW data is relevant for informed decisions. Water scarcity due to climate change scenarios highlights the relevance of producing DW data as the first step for generating strategies to use DW as a resource.

**Keywords:** water quality and quantity, internet of things, decision support systems.

## **Introduction**

Climate change has a variety of impacts, including causing water scarcity, which is a studied issue (Gosling & Arnell, 2016). To cope with water scarcity, alternative solutions, such as the use of wastewater, are assessed for implementation, including management regulations (Lavrni & Mancini, 2017). Safely treated domestic wastewater (DW) can be an alternative source of water for agriculture that provides valuable nutrients. However, DW quality and quantity data is usually missing (WHO et al., 2020).

DW time series can be obtained via sampling. However, analyzing DW samples in the lab is expensive. Additionally, to obtain DW time-series variability across space and time, sampling must be performed for a long time, with high frequency, and simultaneously at different locations in the sewage system. Hence, these samples are scarce in the global south and do not exist at multiple spatiotemporal scales (i.e., neighborhood blocks and hourly timesteps) even when modern *in-situ* sensor technologies are available. The mentioned situation applies to Mexico, our case study.

DW data can clarify DW's characteristics in quality and quantity to progress on better DW management policies, pollution control, and population health studies. DW data can be generated with monitoring systems and sensors based on Internet of Things (IoT) technologies (Salem et al., 2022). IoT in water monitoring is an emerging technology that is key in executing actions to manage DW efficiently and with certainty. Monitoring the variability of DW pollutant loads in space and time also provides transparency while allowing us to answer when and where significant variations of DW loads occur.

As an alternative solution to the lack of DW data, models based on IoT data can provide the DW time series considering population dynamics. To do this effectively, we must develop methods that handle the complexity of DW dynamics in space and time while dealing with high DW variabilities.

Variations in DW time series are driven by population, consisting of differences such as the utilization of water appliances and population mobility. Atinkpahoun et al. (2018) mention that inhabitants' mobility influences DW dynamics, and working, economic activities, and education hours play a relevant role.

Despite its importance, very little research investigates how to provide DW spatiotemporal data based on IoT technologies. Some existing models of DW time series (De Keyser et al., 2010) focus on generating data mainly as inputs for the design of treatment plants. Penn (2017) emphasizes the simulation of DW volume across the sewage network and does not consider DW pollutants. Rodríguez (2013) worked on both DW quality and quantity. However, to the author's knowledge, few studies model spatiotemporal DW quality and quantity data integrating IoT technologies. The objective is to present the generation of DW data by highlighting IoT technology use, specifically to provide DW time series at the neighborhood blocks.

### **Theoretical framework**

The theoretical frameworks from Shi et al. (2019) and Bosmans et al. (2019) are adapted, focusing on using IoT technologies for modeling purposes. First, a case study is selected to use IoT for modeling DW in quality and quantity in decentralized sanitation systems where data is usually lacking. Modeled outputs target institutional users who research or monitor the environment for decision-making. The IoT technology is based on two sensors: a) watermeters used for measuring the flow of water appliances, and b) a spectrometry that provides the concentration of pollutants, such as the TSS indicator given a sample of DW. The sensors are configured to access the internet and connect to a cloud service to store real-time events in a database. The IoT data is processed for providing statistical information for building a spatiotemporal DW model for the locality considering population census data in neighborhood blocks. The modelled output allows providing timeseries maps of the production of DW in quality and quantity.

### **Materials and methods**

The selected case study is Huehuetla, a small locality in Hidalgo, Mexico (Figure 1). Huehuetla has a treatment plant based on wetlands (Figure 2) located on the northeastern side of the locality. The case study's census data come from the Mexican federal census

survey (INEGI, 2016). The census data provides information on economic activities, population, and neighborhood blocks.

Based on Friedler & Butler (1996), water appliances (kitchen, shower, basins, toilet, and washing machine) are targeted for data collection with an IoT monitoring system where water quality and quantity sensors are used (Figure 3). Measurements consist of water appliance discharges (lt) and DW quality of total suspended solids (TSS) for each water appliance. The IoT sensors make capturing event frequencies, variabilities, and probabilities possible by each water appliance producing DW, such as the number of events, liters, and pollutants loads per event.

A simulation uses the statistical information from the IoT system to generate DW data. The simulated DW particles are produced by inhabitants' actions of using water appliances. In the simulation, the production of DW is stochastic because the inhabitants from the census data follow schedules based on the distribution of probabilities that water appliance events occur, such as toilet, shower, kitchen, basin, and wash machine. The simulation runs a time window of two weeks, allowing the verification of the general DW patterns and trends described in the bibliography (Von Sperling, 2007).

**Figure 1**

*Locality of Huehuetla, Hidalgo, Mexico. On the right, the brown shapes represent the 54 blocks of the locality. Red points represent economic activities*



Fuente: INEGI, 2018.



**Figure 2**

*Wastewater treatment plant in Huehuetla. The wastewater treatment plant is a nature-based sanitation solution of wetlands*



**Figure 3**

*IoT system with water quality and quantity sensors. 3.a Shows a water meter that quantifies the flow of water. 3.b and 3.d shows the cloud system storing and plotting data generated by the sensors when a water appliance is used. 3.c Shows a wastewater spectrolyser used to measure the total suspended solids*



**Figure 4**

*Example of the installation of water meters. 4.a Shows how a watermeter can be installed in the shower for measuring litter consumed. 4.b Shows the items of the water meter components to send the data to the cloud*



As not all neighborhood block data can be displayed, a selection is implemented to elaborate on the results and discussion, as seen in Figure 5. The tags used in Figure 5 are the geospatial key (CVGEO). Our analysis highlights population size because it can significantly define DW time series patterns. In water infrastructure design, population size is a parameter that water experts use to define the infrastructure characteristics, for instance, of a wastewater treatment plan. The purple block contains an elementary school and preschool, which is relevant to show DW production from students. The green block has 122 inhabitants, which allows seeing the DW quantity from a block with a dense

population. Contrary, the blue block has 14 inhabitants where low DW production is expected. The orange block shows a high activity from 385 workers.

**Figure 5**

*Selected colored blocks of interest showing their Geospatial ID key (CVEGEO). Red points represent working places*



*Results and discussion*

Figure 6 shows the results of the produced data of DW TSS concentration in mg/l. To compare the DW pattern differences between blocks and the DW catchment area, Figure 6 shows the TSS concentration from four blocks and the catchment. Each curve captures a daily pattern of the inhabitants, which can be seen as a daily bimodal peak on Wednesday and Thursday. However, each block and the catchment patterns differ as expected, with TSS values mainly oscillating between 150 and 500 mg/l. The selected blocks show

peaks that may or may not occur simultaneously or with different or similar magnitudes of TSS values because of the activities that occur in the blocks and the population size. For instance, Figure 6 shows the whole locality catchment (brown line with 2814 inhabitants), reflecting that TSS at the locality level has lower variability than individual blocks with a lower population. A block can show several peaks of DW variations, while a catchment with a high population can show only a few peaks in one day.

**Figure 6**

*Differences between spatial variations between several blocks and the catchment (brown line)*

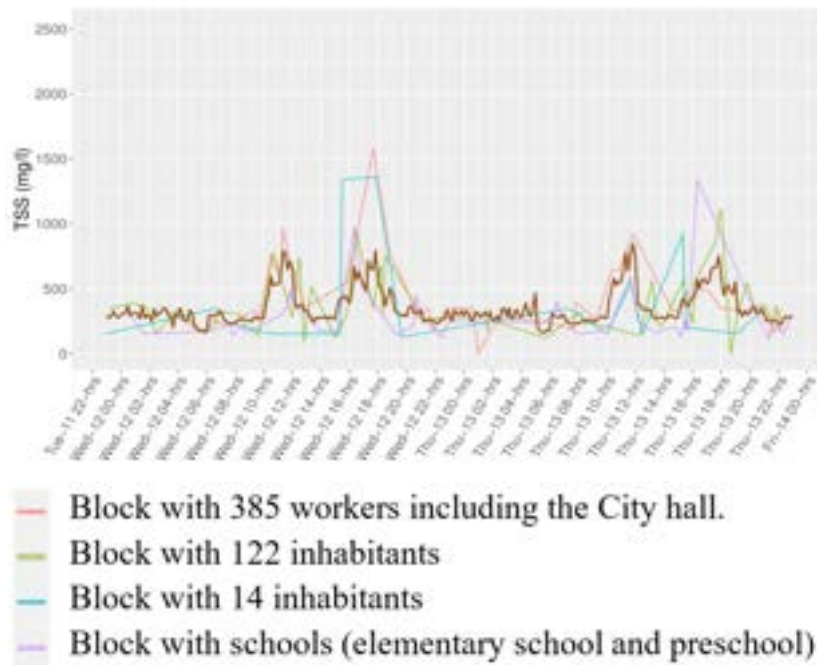
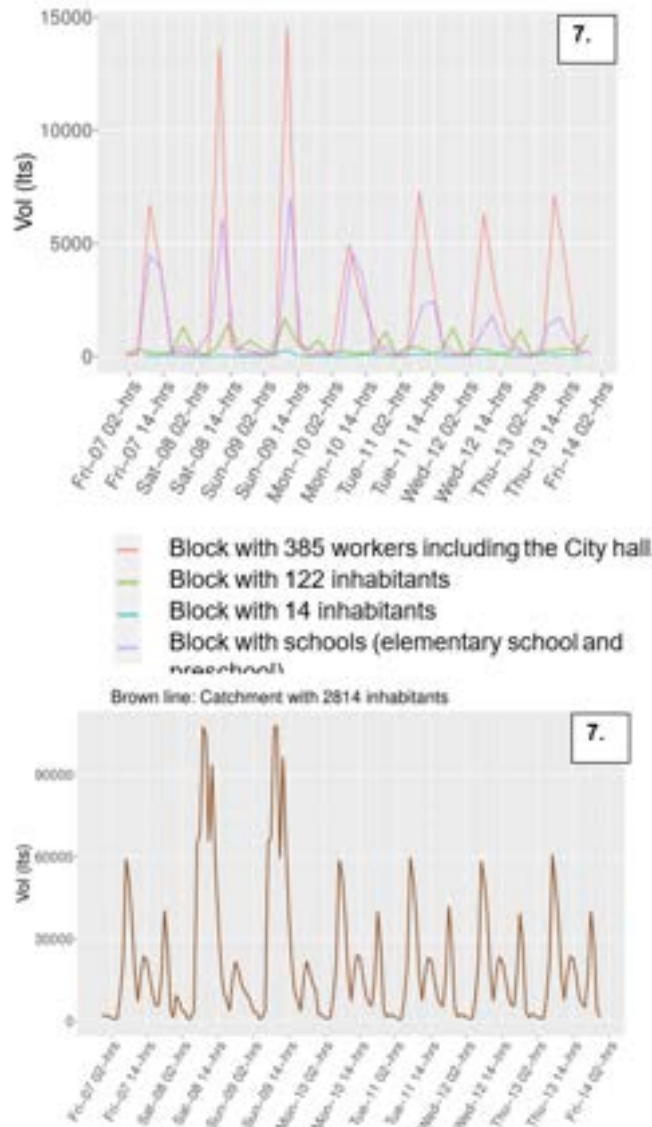


Figure 7 shows the change in magnitude of the production of DW volume at blocks by population size. In DW volume is possible to detect the impact of DW patterns due to economic activities, where inhabitants move into working and school places, imitating population mobility. For example, the orange and purple lines refer to blocks with a high population (schools and working places) and mostly follow the trend of the locality catchment because the three mentioned lines have a higher population size. Low values in the time series are present when the population is inactive, for example, when school time finishes, representing a DW pattern with a low population in the block. The city hall

block also presents a similar pattern to schools, which makes sense because the inactivity in the city hall block is comparable with students leaving the school. It is also interesting to note that time series patterns have a wider time window during weekends than on weekdays. These patterns are because inhabitants are free to use water more distributed during the hours of the weekends, while in weeks, inhabitants have specific hours for water use due to work and school schedules.

**Figure 7**

*Domestic wastewater data at neighborhood blocks and wastewater treatment plant. 7.a and 7.b: Time series data of produced DW at selected blocks and the treatment plant*



## Conclusions

We present an alternative for providing data DW in quality and quantity using IoT technology, water sensors, and modeling. The data allows for analyzing the variability of DW volumes and pollutant concentrations at different times and places. In contrast with DW pollutants, the DW volume magnitudes and variability change drastically based on time, place, and population in the blocks and the locality catchment. The DW time series patterns reflect the location properties and the use of water appliances between places. The simulation based on IoT data, water meters, and a spectrometry generates statistical data to illustrate human behavior based on inhabitants' properties. The generated DW data from water-use events allows providing DW timeseries to represent a data source for the planning of strategies for wastewater use. Wastewater use becomes a relevant option under climate change with water scarcity scenarios. DW data generation, collection, processing, and preservation can lead to the transition to using DW as a water resource. The method for generating the spatiotemporal DW data will be further developed and documented as a future step.

## References

- Atinkpahoun, C. N. H., Le, N. D., Pontvianne, S., Poirot, H., Leclerc, J. P., Pons, M. N., & Soclo, H. H. (2018). Population mobility and urban wastewater dynamics. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1431–1437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.087>
- Bosmans, S., Mercelis, S., Denil, J., & Hellinckx, P. (2019). *Challenges of Modeling and Simulating Internet of Things Systems*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02607-3\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02607-3_42)
- Friedler, E., & Butler, D. (1996). Quantifying the inherent uncertainty in the quantity and quality of domestic wastewater. *Water Science and Technology*, 33(2), 65–75. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00190-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00190-4)
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). *A global assessment of the impact of climate change on water scarcity*. 371–385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>

- INEGI. (2016). Censo de Población y Vivienda 2010. *INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2018). *Mapa Digital de México V6.3.0*. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bG-F0OjE5LjkxMzMzMyLGxvbjotOTkuMzQ4MzAsejoxMCxsOmMxMDJt&layers=c100,c101,c109,c108>
- Lavrni, S., & Mancini, M. L. (2017). *Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe : Focus on Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3425-2>
- Salem, R. M. M., Saraya, M. S., & Ali-eldin, A. M. R. M. T. (2022). An Industrial Cloud-Based IoT System for Real-Time Monitoring and Controlling of Wastewater. *IEEE Access*, *10*, 6528–6540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141977>
- Shi, W., Wang, Y., Tang, H., Liu, H., & Tang, D. (2019). Research on Water Quality Monitoring Technology of Industrial Park Based on Internet of Things and Cloud Computing. *Journal of Physics: Conference Series*, *1314*, 012219. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012219>
- Von Sperling, M. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. Biological Wastewater Treatment Series: Volume 1*. IWA Publishing. [www.iwapublishing.com](http://www.iwapublishing.com)
- WHO, W. H. O., UN-Habitat, U. N. H. S. P., & UNSD, U. N. S. D. (2020). *Indicator 6.3.1: Proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated. SDG indicator metadata (Harmonized metadata template-format version 1.0)*. <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-06-03-01.pdf>



# A GOVERNANCE ANALYSIS OF THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE EUROPEAN WATER SECTOR

Cesar Casiano Flores  
A. Paula Rodríguez Müller

## Abstract

Digitalisation in the water sector is expected to address water-related challenges and support Europe's Twin Transition (digital and green transition). However, there is a limited understanding among users and providers of digital public services regarding the specific conditions and complexities of digitalisation, innovation and water from a governance perspective. To increase our governance understanding on those subjects, we have selected three cases where artificial intelligence has been implemented in the water sector. The analysis uses the *who-how-what* analytical framework within the hierarchy, market, and network governance modes approach. We analyse and triangulate information obtained via secondary sources to achieve this objective. The analysis provides insights into the actors driving collaborative governance strategies to foster innovation. In the Netherlands case, we found a market approach; in Portugal, a mixed mode that combines hierarchical and network modes; and in the Polish case, a hierarchical mode. Despite the differences in the three cases, governmental actors play a key role, ranging from facilitating coordination and co-funding to direct involvement. Moreover, all the cases had a narrow innovation focus on environmental technologies to drive sustainability. Understanding the limitations of our research, we propose, as a next step, to conduct an

in-depth case analysis, including primary sources of data. We also invite future research to expand the understanding of the complex interplay between disruptive technologies, innovation, and governance in the water sector.

**Key words:** water governance, artificial intelligence, Europe.

## **Introduction**

Water governance remains at the core of sustainable development, especially as water resources face escalating pressures from factors such as population growth, economic development, and climate change (Özerol et al., 2018). Against this context, the imperative for effective water management has never been more critical. Ensuring sustainability demands a coordinated approach that integrates the development and management of surface water, groundwater, and land use at a hydrological basin level. To navigate these challenges, the European Union (EU) has implemented the Water Framework Directive (EU WFD) (EC WFD, 2000). This landmark legislation underscores the importance of river basin management, engaging in extensive consultation and coordination with all stakeholders, and robustly applying the “polluter pays” principle. Alongside the Environmental Quality Standards Directive for surface waters and the Groundwater Directive, the EU WFD has sculpted the framework for sustainable water management across Europe since the early and mid-2000s (European Commission, 2022).

Despite efforts to address Europe’s varied water issues, there is still much work to be done. Policy coordination and coherence are crucial but often difficult to achieve (Jager, et al. 2016). Digitalisation has emerged as a promising solution, as it has the potential to make water policy more mainstream and enable more effective actions. For instance, the EU WFD has actively endorsed the integration of Earth Observation and data-driven models into water technologies (Carvalho et al., 2019). Further, the 2019 European Green Deal has underscored the potential of digitalisation to achieve environmental and climate goals, advocating sustainable digital technologies as essential enablers for an equitable green transition (European Commission, 2019). Leveraging digital technologies such as sensor networks, artificial intelligence (AI), and big data analytics, promises to optimise water management, enhance water systems resilience (European Commission, 2023),

promote stakeholder engagement and enable more efficient and sustainable use of water resources (EISMEA, 2021).

In envisioning a water-smart society, the interplay between digital transformation and digital services may immerse the water sector in the data economy paradigm. Emerging technologies, notably AI, have the potential to redefine water governance by enabling better decision-making, improving resource efficiency, and reducing operational costs. Thus, the development and implementation of robust, smart, and tailored water management systems, solutions, and multi-sectoral governance models become essential not only in Europe but globally, to address water-related challenges and align with Europe's Twin Transition (digital and green transition) (European Commission, 2023; Stein et al., 2022).

Yet, despite a promising technological scenario, the water sector needs higher level of maturity concerning the integration and standardisation of information and communication technology (ICT), business processes, and legislative framework implementation. The water sector's fragmented nature, along with limitations in organisational and financial resources, emphasises the need for system standards to enable smart water solutions. These standards can promote common meta-data structures, standard protocols, and interoperable interfaces (European Commission, 2023; Stein et al., 2022). Additionally, there remains a lack of coherence in European policies related to digitalisation in the water sector. Users and providers of digital services also have a limited understanding of water governance conditions (Stein et al., 2022), which presents further hurdles.

This study aims to contribute to this gap, providing a governance modes analysis of cases where disruptive technologies like AI have been employed to innovate in the water sector. The chapter is organised as follows. First, the theoretical framework is discussed, followed by the methodological approach employed in this study. Next, the results are presented per case. Finally, a discussion of the findings and concluding remarks are outlined.

## **Theoretical framework**

The challenges of water crises across the globe are widely recognized as crises of governance (Özerol et al., 2018). This requires a deeper understanding of governance

mechanisms and their role in promoting innovations that can address such crises. In this study, water governance is understood as “the social function that regulates development and management of water resources and provisions of water services at different levels of society and guiding the resource towards a desirable state and away from an undesirable state” (Pahl-Wostl, 2015, p. 25).

Among the different perspectives on water governance, the approach using hierarchy, market, and network modes has gained popularity in the literature on governance. The three modes function as coordinating frameworks (Bouckaert et al., 2010) and are instrumental in understanding how collective issues like urban water management are managed (van de Meene et al., 2011). These frameworks facilitate an analysis of decision-making, implementation processes and the dynamics between participating actors (Meuleman, 2008), recognising that often coexist and overlap (Pahl-Wostl, 2019; Whelan, 2015).

The hierarchy mode primarily concentrates on regulatory procedures based on formal norms and sanctions; moreover, authority, power, and the hierarchy’s official position are the steering sources (Pahl-Wostl, 2019). In contrast, the market mode is built on formal and informal institutions. The process and financial incentives serve as the basis for steering. Players are driven to increase their material advantages, and in this situation, power comes from having access to wealth and material resources (Pahl-Wostl, 2019). Lastly, informal institutions dominate the network mode. In this case, trust and voluntary cooperation are the sources of steering, and one’s position in the network confers power. The informality and flexibility of the network make it a good platform for learning and modifying processes (Pahl-Wostl, 2019).

While these three modes of governance offer valuable insights into understanding sustainable innovations, they have been criticised for oversimplifying the complexities of governance. Moreover, the intricate interplay between participating individuals, both directly and indirectly involved in the governing process, is often left unaddressed. To enrich this understanding, the study extends the discussion to include the “who”, “how” and “what” of sustainable innovations governance (Lupova-Henry & Dotti, 2019).

The first variable (‘who’) seeks to identify the primary actor responsible for implementing governance strategies for long-term innovation. Three perspectives can be identified within the hierarchy, market and network approach: state-centric, corporate-

centric and society-centric approaches (Lupova-Henry & Dotti, 2019). The question of “how” to govern sustainable innovations ultimately comes down to two fundamental considerations: how much the primary actor engages with stakeholders and what the main approaches are to such engagement (Lupova-Henry & Dotti, 2019). Sustainable innovation governance must consider the third dimension to shed light on “what” is being governed, and for this, two extremes have been identified. The narrower innovation definitions focus on environmental technologies to drive sustainability, while the more holistic approaches emphasise the interaction between sustainability’s environmental and socioeconomic aspects (Lupova-Henry & Dotti, 2019).

By considering these dimensions, the theoretical framework provides a nuanced view of water governance, capturing the complexities and interactions, allowing for a more detailed examination of how sustainable innovations can be effectively governed to meet the challenges of the global water crisis.

## **Methodology**

In alignment with the theoretical framework, the methodology for this study employs the *who*, *how*, and *what* structure as a lens to explore the selected cases through the hierarchy, network and market governance modes. This approach is applied to elucidate the various governance configurations evident in the selected cases.

The study relies on a comprehensive desk research approach, drawing on secondary sources including peer-reviewed journal articles, governmental reports, newspaper articles, and relevant websites of involved actors. This wide-ranging data collection enables a nuanced exploration of the national water governance context for each case, followed by an in-depth examination of the case itself.

Recognizing the importance of validity and credibility in research, a systematic triangulation process was employed. Each piece of information was critically analyzed and cross-referenced with other sources to enhance the robustness of the data. This rigorous process ensures that the analysis builds on a solid empirical foundation.

The study’s empirical focus lies in the examination of three specific cases selected from a dataset of AI applications in the public sector, compiled by the Joint Research

Centre of the European Commission (European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2021). The selection process was carried out in multiple stages:

- 1. Preliminary Selection:** 24 cases were initially identified based on the criterion of AI applications in the water context.
- 2. Refinement:** Cases still in the pilot phase were excluded to focus on governance configurations that were already materialized, reducing the pool to eight cases.
- 3. Relevance Check:** A detailed review of the remaining cases revealed that some were unrelated to water governance, narrowing the sample to four cases.
- 4. Final Selection:** In-depth examination led to the selection of one case each from The Netherlands and Poland, and two from Portugal. However, due to insufficient information regarding one Portuguese case, the final selection consisted of three cases.

This selection process allowed a sample of three cases that is both relevant and representative, which form the basis of the analysis presented in the subsequent section.

## **Results and discussion**

This section presents and analyses the results of the study focusing on three selected cases from The Netherlands, Portugal, and Poland. Each case is explored in the context of its national water governance system, highlighting the distinctive governance modes, stakeholders involved, specific projects, and technological innovations. The discussion further interprets the outcomes in light of the theoretical framework, illustrating how each case contributes to our understanding of the governance configurations within the context of water management and AI in the public sector.

### **The Netherlands**

*Governance perspective:* The Netherlands is indicative of a hybrid governance system where governance modes are balanced and no mode dominates. This is common in countries with effective formal institutions and polycentric governance systems, such as The Netherlands (Pahl-Wostl, 2019). There is decentralisation and coordination of

largely autonomous actors, an approach that has evolved over decades (Pahl-Wostl, 2019). Innovations have emerged from networking of policy entrepreneurs outside the governmental hierarchical structure (Huiteima & Meijerink, 2009), and through a positive connection between informal networks and formal policy processes (Pahl-Wostl, 2019). The evolution from a command-and-control approach centred on hard infrastructure measures to a more environmentally conscious approach to an integrated, adaptive approach (Pahl-Wostl, 2019) is also significant in terms of wastewater treatment, where The Netherlands has a very high compliance (OECD, 2020b).

*Selected case:* The selected project was focused on wastewater management and was a collaboration between the government and HAL24K. HAL24K Labs provides operational and predictive intelligence using cutting-edge data science techniques, like machine learning and deep neural networks, with modelling, analysis, and visualisation to enable real-time data-driven decision-making in complex and multidimensional contexts. The aim is to reduce expenses, minimise disruptions, and maximise resource use (HAL24K Labs, 2022). The platform named Dimension: developed by HAL24K offers tools and capabilities to solve complex challenges and realise operational change. From data ingestion through to predictive planning, Dimension is described as powerful, comprehensive and practical. It supports data-driven decision-making is at hand and operational transformation possible (HAL24K, 2022).

A Dutch Water Boards was the client of HAL24K for predictive maintenance for water treatment plants. The Dutch Water Board have responsibilities on the treatment and cleaning of wastewater and to maintain key infrastructure they monitor different systems via alarms and sensors. Considering that water infrastructure maintenance is complicated, and efficiencies rely on sensors to provide alerts, the Water Board wanted to know if operators could intervene before an emergency occurred. To address this demand, HAL24K built sensor network models using data from sensors, reported alarms, maintenance, and failure logs. As a result, equipment failure can be predicted, proactive maintenance and resource planning can be implemented, and end-of-life management requirements can be met across the network to avoid downtime. This innovation aims to increase operational effectiveness, prolong the useful life of important equipment and reduce expenses (HAL24K, 2018).

In summary, this case involves governmental and private companies, responding mainly to a market collaboration. Regarding how this innovation is governed, the primary actor, which is the Water Board, does not really engage other stakeholders. Finally, in terms of “what”, we can assume from the information collected that there is a narrower innovation, which focuses on environmental technologies to drive sustainability.

## **Portugal**

*Governance perspective:* Portugal’s Water Law encompasses various combinations of governance modes, requiring significant institutional efforts and new organisational steps, for which government agencies and stakeholders may be unprepared (Fidélis et al., 2019). They include hierarchical direct management, delegated management, and water service concessions provided by state-owned, municipal, and private entities. There are about 300 utilities, approximately 80% involve direct management, 10% delegated management, and the remaining 10% involve concessions (Baptista, 2019). Multilevel and networked governance is fostering more decentralised administration, reshaping institutional procedures. The recent and gradual delegation of competencies to local and inter-municipal authorities has emphasised this paradigm shift. Yet, networked governance demands complex relationships and stronger ties between various stakeholders (Fidélis et al., 2019). Recent studies highlight that water utilities have begun implemented Water Safety Plans (tools for comprehensive risk management of human consumption water supply) for innovation (Roeger & Tavares, 2020).

*Selected project:* In Portugal, the identified project is WISDom-Water. Its objective is to implement applications addressing specific water utilities’ needs, such as flow rate data processing, determining the best location for pressure sensors, identifying critical distribution network areas for pipe burst location, and prioritizing pipes for rehabilitation (Carriço et al., 2023). The project “developed several artificial intelligence techniques to extract knowledge from the data and to address several WDS [Water distribution system] problems, such as data processing and analysis, pressure sensor location, pipe burst detection and location, pipe condition assessment, and water age performance assessment” (Carriço et al., 2023).



The WISDom-Water project is at the national level and has a partnership with the Empresa Municipal de Agua e Saneamiento de Beja (emas) (WISDom, 2018). This is a water utility that designs, builds and operates water supply and sanitation infrastructures (emas, 2023). Other partners of the project is the company of Infranquinta, which manages the water supply infrastructure in Quinta do Lago and neighbouring resorts as well as collection of urban waste (infranquinta, 2022). Other key stakeholder is the Camara Municipal Barreiro (Barriero City Council) (Câmara Municipal do Barreiro, 2023). Academic institutions like Instituto Politécnico de Setúbal, Instituto Superior Técnico de Lisboa and the Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores: Investigação e Desenvolvimento em Lisboa, are also involved (INESC-ID, 2019). The project is funded by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) and co-financed with the Instituto Politécnico de Setúbal (FCT, 2018).

In the WISDom-Water project in Portugal, collaboration occurs primarily between water utilities and academic institutions, with financial support provided by FCT. The governance mode of this project appears to be mixed, encompassing both hierarchical structures within government-supported entities and networked relationships between various stakeholders. Regarding the manner in which this innovation is governed, it is evident that the primary actors are confined to those directly engaged in the project. This close-knit collaboration ensures a focused approach towards the project's goals, although it might limit the potential for broader stakeholder engagement. Finally, as for the nature of the innovation itself, analysis of the available information reveals a narrow innovation, which focuses on technological advancements in the environmental sector aimed at enhancing sustainability within water management.

## **Poland**

*Governance perspective:* In Poland, the complex governance landscape of waterworks and wastewater systems is shared among municipalities, counties, and provincial governments. Municipalities and counties have the primary responsibility for managing these systems, whereas provincial governments oversee the issuance of permits and water use regulation. A river basin management approach was introduced in the late 1980s. Subsequent reforms in 1999 further delineated responsibilities for the river basin

planning and coordination, although significant fragmentation in competencies remains a challenge (Jager et al., 2016). Recently, Poland has witnessed a moderate increase in public participation in water management (Jager et al., 2016), yet governance remains predominantly with financial transfers tightly controlled by the central government (Ferry, 2021). Various institutions shoulder the management of water supply and sanitation, with the National Water Management Authority acting as the overall governing body. At the local level, municipalities (gmina) are responsible for water supply and wastewater collection infrastructure (OECD, 2020a). In terms of wastewater, Poland's decentralised system comprises 3278 municipal wastewater treatment plants, with public urban wastewater treatment systems reaching less than 80% of the population (Kacprzak & Kupich, 2021).

*Selected project:* The identified project in Poland is entitled “Monitoring of Water Treatment Stations” and falls under the purview of the Ministry of Digitalisation (2023). Specifically targeting the Kartuzy Water Treatment Plant, the initiative emphasises an array of operational aspects including the measurement of flow rate and network pressure, control and regulation of intake operation, and monitoring of water distribution. Additionally, it seeks to balance the volume of water distributed to the network, such as tracking water loss. The project has been implemented in the city of Kartuzy as part of the actions of the Ministry of Digitalisation.

In evaluating this case, collaboration is observed between governmental actors within a governmental project. Characterized by its hierarchical mode of governance, the interaction between local and national governments is evident. As such, innovation is governed strictly by these governmental actors, emphasising a central authority's role. Finally, drawing parallels with the previous cases, the information presented leads to the conclusion that there is a narrow innovation focus on environmental technologies to drive sustainability.

## **Conclusions**

This study is at an early, exploratory stage and relies on limited information from secondary sources. Nevertheless, the results offer valuable insights into the ways governance modes and AI innovations are being applied in the water sector. By examining different

configurations of collaboration and government involvement in the Netherlands, Portugal and Poland, the study has begun to shed light on how various actors work together to foster innovation in the field. These initial results provide a strong starting point for a deeper understanding of the strategies and relationships that drive innovation, with a particular focus on environmental technologies to enhance sustainability. In analysing the cases, distinct patterns emerged:

1. In the Netherlands, a market-driven approach was identified, where the government engaged a private company, illustrating a commercial collaboration.
2. The Portuguese scenario revealed a blend of hierarchical and network modes, characterized by collaboration between water utilities and academic institutions, supported by a federal project.
3. The Polish case was predominantly hierarchical, featuring collaboration between federal and local water authorities.

Notably, despite the differences, governmental actors play a key and multifaceted role in all three cases, ranging from facilitators of the coordination to direct participants. A shared characteristic across the cases is a narrow innovation effort focused on environmental technologies to drive sustainability, with two of the three cases centring on wastewater treatment.

These results align with recent developments in governance research, particularly within the realm of meta-governance literature. Such literature recognises governmental actors as central policy coordinators via one or more governance modes (Gjaltema et al., 2020). Moreover, it emphasises the intricate coordination and collaboration with hybrid governance systems that comprise hierarchical, market, and network governance modes (Casiano Flores, 2022).

Considering this study's limitations, the next steps will involve conducting an in-depth and comparative analysis of the three cases and expanding the research to include other disruptive technologies from a governance perspective. This is needed to increase our understanding on the governance constraints and enablers of innovation within the water sector and for exploring the complex roles of digital public services users and providers in shaping water governance.

Understanding the limitations of this research, we propose as a next step to conduct in-depth case analysis including primary sources of data. We also invite future research to delve into and expand the understanding of the complex interplay between disruptive technologies, innovation, and governance in the water sector. Through in-depth and comparative studies, best practices and policies that facilitate the adoption of innovative and enhance water governance can be identified. This pursuit aligns with a broader objective of fostering a more sustainable and resilient water future.

## **References**

- Baptista, J. M. (2019). Portugal. In *Facing the Challenges of Water Governance* (Vol. 2015, Issue 3, pp. 85–109). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98515-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98515-2_4)
- Bouckaert, G., Peters, G., & Verhoest, K. (2010). *The Coordination of Public Sector Organizations. Shifting Patterns of Public Management*. Palgrave Macmillan UK.
- Câmara Municipal do Barreiro. (2023). *Atribuições e Competências*. <https://www.cm-barreiro.pt/municipio/camara-municipal-do-barreiro/atribuicoes-e-competencias>
- Carriço, N., Ferreira, B., Antunes, A., Caetano, J., & Covas, D. (2023). Computational Tools for Supporting the Operation and Management of Water Distribution Systems towards Digital Transformation. *Water*, 15(3), 553. <https://doi.org/10.3390/w15030553>
- Carvalho, L., Mackay, E. B., Cardoso, A. C., Baattrup-Pedersen, A., Birk, S., Blackstock, K. L., Borics, G., Borja, A., Feld, C. K., Ferreira, M. T., Globevnik, L., Grizzetti, B., Hendry, S., Hering, D., Kelly, M., Langaas, S., Meissner, K., Panagopoulos, Y., Penning, E., ... Solheim, A. L. (2019). Protecting and restoring Europe's waters: An analysis of the future development needs of the Water Framework Directive. *Science of The Total Environment*, 658, 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.255>
- Casiano Flores, C. (2022). Toward a contextualized research agenda: Governance challenges of the wastewater treatment policy in Mexico and the role of subnational governments. *WIREs Water*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1617>

- EISMEA. (2021). *The need for digital water in a green Europe: EU H2020 projects' contribution to the implementation and strengthening of EU environmental policy*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2826/4352>
- emas. (2023). *EMAS - Empresa*. Empresa. <https://emas-beja.pt/empresa>
- European Commission. (2019). *Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions—The Europeangreendeal* (COM(2019) 640 final; p. 24). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC\\_1&format=PDF/](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF/)
- European Commission. (2022, October 26). Why are up-to-date water pollution rules important? *Questions and Answers on New EU Rules on Surface Water and Groundwater Pollution*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_22\\_6279](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_6279)
- European Commission. (2023). Water Management Digitalisation. *Rolling Plan 2023 for ICT Standardisation*. <https://joinup.ec.europa.eu/collection/rolling-plan-ict-standardisation/water-management-digitalisation-rp2023>
- European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2021). *Selected AI cases in the public sector [Dataset]*. Joint Research Centre (JRC). <http://data.europa.eu/89h/7342ea15-fd4f-4184-9603-98bd87d8239a>
- FCT. (2018). *WISDom Sistema Inteligente de Dados de Água*. [https://www.ips.pt/ips\\_si/web\\_gessi\\_docs.download\\_file?p\\_name=F-406648829/WISDom.pdf](https://www.ips.pt/ips_si/web_gessi_docs.download_file?p_name=F-406648829/WISDom.pdf)
- Ferry, M. (2021). Pulling things together: Regional policy coordination approaches and drivers in Europe. *Policy and Society*, 40(1), 37–57. <https://doi.org/10.1080/14494035.2021.1934985>
- Fidélis, T., Teles, F., Roebeling, P., & Riazi, F. (2019). Governance for Sustainability of Estuarine Areas—Assessing Alternative Models Using the Case of Ria de Aveiro, Portugal. *Water*, 11(4), 846. <https://doi.org/10.3390/w11040846>
- Gjaltema, J., Biesbroek, R., & Termeer, K. (2020). From government to governance... to meta-governance: A systematic literature review. *Public Management Review*, 22(12), 1760–1780. <https://doi.org/10.1080/14719037.2019.1648697>

- HAL24K. (2018, December 20). *Predictive maintenance for water treatment plants*. HAL24K Labs. <https://hal24k.com/cases/predictive-maintenance-water-treatment-plants>
- HAL24K. (2022). *Dimension*. HAL24K Labs. <https://hal24k.com/dimension>
- HAL24K Labs. (2022). *About us*. <https://hal24k.com/the-company>
- Huitema, D., & Meijerink, S. (2009). Policy dynamics in Dutch water management: Analysing the contribution of policy entrepreneurs to policy change. In *Water Policy Entrepreneurs: A Research Companion to Water Transitions around the Globe* (pp. 349–368).
- INESC-ID. (2019). About Us. *INESC-ID*. <https://www.inesc-id.pt/about-us/>
- infraquinta. (2022). *Infraquinta services*. Infraquinta - Empresa de Infraestruturas Da Quinta Do Lago, E.M. <https://www.infraquinta.pt/en/gestao-ambiental/services>
- Jager, N., Challies, E., Kochskämper, E., Newig, J., Benson, D., Blackstock, K., Collins, K., Ernst, A., Evers, M., Feichtinger, J., Fritsch, O., Gooch, G., Grund, W., Hedelin, B., Hernández-Mora, N., Hüesker, F., Huitema, D., Irvine, K., Klinke, A., ... von Korff, Y. (2016). Transforming European Water Governance? Participation and River Basin Management under the EU Water Framework Directive in 13 Member States. *Water*, 8(4), 156. <https://doi.org/10.3390/w8040156>
- Kacprzak, M. J., & Kupich, I. (2021). The specificities of the circular economy (CE) in the municipal wastewater and sewage sludge sector—Local circumstances in Poland. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02178-w>
- Lupova-Henry, E., & Dotti, N. F. (2019). Governance of sustainable innovation: Moving beyond the hierarchy-market-network trichotomy? A systematic literature review using the ‘who-how-what’ framework. *Journal of Cleaner Production*, 210, 738–748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.068>
- Meuleman, L. (2008). Theoretical framework. In *Public Management and the Metagovernance of Hierarchies, Networks and Markets* (pp. 9–86). Physica-Verlag HD. [https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2054-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2054-6_2)
- Ministry of Digitalisation. (2023). *Mapa innowacji -Monitoring of Water Treatment Stations*. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/mapa-innowacji>
- OECD. (2020a). *Poland. Financing Water Supply, Sanitation and Flood Protection*.

- OECD. (2020b). *The Netherlands. Financing Water Supply, Sanitation and Flood Protection*.
- Özerol, G., Vinke-De Kruijf, J., Briboise, M., Casiano Flores, C., Coentjn, G., Knieper, C., Ortega, M., Mirnezami, J., Ranjan, P., Schroeder, N., & Schröter, B. (2018). Comparative studies on water governance: A systematic review. *Ecology & Society*. <https://doi.org/10.5751/ES-10548-230443>
- Pahl-Wostl, C. (2015). *Water Governance in the Face of Global Change: From Understanding to Transformation*. Springer.
- Pahl-Wostl, C. (2019). The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environmental Science & Policy*, 91, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.008>
- Roeger, A., & Tavares, A. F. (2020). Do Governance Arrangements Affect the Voluntary Adoption of Water Safety Plans? An Empirical Study of Water Utilities in Portugal. *Water Resources Management*, 34(5), 1757–1772. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02527-2>
- Stein, U., Benedict, B., Englund, A., Elelman, R., Amorsi, N., Lombardo, F., Corchero, A., Brékiné, A., Lopez Aquillar, F., & Ferri, M. (2022). *Digitalisation in the water sector recommendations for policy developments at EU Level*. <https://doi.org/10.2848/915867>
- van de Meene, S. J., Brown, R. R., & Farrelly, M. A. (2011). Towards understanding governance for sustainable urban water management. *Global Environmental Change*, 21(3), 1117–1127. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.003>
- Whelan, C. (2015). Managing Dynamic Public Sector Networks: Effectiveness, Performance, and a Methodological Framework in the Field of National Security. *International Public Management Journal*, 18(4), 536–567. <https://doi.org/10.1080/10967494.2015.1030484>
- WISDom. (2018). *WISDom Knowledge from water data*. <https://wisdom.ips.pt/#services>

# **USO INDISCRIMINADO DEL RECURSO HÍDRICO POR EL SECTOR AGRÍCOLA Y AFECTACIÓN EN EL ABASTECIMIENTO URBANO (CD. JIMÉNEZ, CHIHUAHUA)**

María de Lourdes Ballinas Casarrubias

María del Carmen González Horta

María del Rocío Infante Ramírez

Margarita Sofía García Madrid

## **Resumen**

La Ciudad Jiménez se encuentra al sureste del Estado de Chihuahua en el municipio del mismo nombre. Desde la década de los noventa se conoce que la región presenta altos niveles de arsénico en el agua de consumo humano, que es de origen subterráneo primordialmente. La situación actualmente ha desmejorado debido a que el acuífero del cual se abastece, el Jiménez-Camargo, se encuentra en sobre explotación. Debido a esto, la calidad del agua ha empeorado más, y la disponibilidad del recurso cada vez es menor. Las soluciones a la calidad del agua, han podido ponerse en marcha en algunos de los aprovechamientos, sin embargo, el alto consumo del recurso hídrico por el sector agrícola, ha disminuido sustancialmente los caudales, impidiendo incluso alcanzar los valores mínimos para poder aplicar los procesos de potabilización implementados. El presente trabajo realizado durante el segundo semestre del 2022, permitió constatar, tanto el abatimiento de los niveles de los pozos que suministran de agua a la Ciudad, como el hecho de que existen tecnologías in situ, que no han podido ponerse en marcha



por falta de las condiciones hidráulicas debido al uso indiscriminado en los pozos nogaleros que circundan a la Ciudad. En conclusión, es necesario la acción ciudadana, de gobierno, de los diferentes sectores implicados para terminar con la situación de escasez y mala calidad de agua, en búsqueda del derecho humano al recurso hídrico por toda la población del Estado.

**Palabras clave:** acuífero Jiménez-Camargo, disponibilidad, uso agrícola.

## **Introducción**

El acuífero Jiménez-Camargo se encuentra ubicado en la parte norte del Estado de Chihuahua México, abarcando varios municipios importantes del Estado de los cuales destaca Jiménez. Al igual que muchos acuíferos en el país, éste enfrenta desafíos relacionados con la sobreexplotación y la disminución de los niveles de agua subterránea. El uso insostenible y la falta de una gestión adecuada pueden llevar a la disminución de la calidad y cantidad del agua disponible. Por consiguiente, es de gran importancia implementar correctas estrategias de gestión y conservación del acuífero. Llevar a cabo la comunicación adecuada de las condiciones y manejo del mismo, así como las prácticas que no están siendo sostenibles y conscientes en relación al uso responsable del agua.

Para realizar políticas públicas adecuadas sobre la gestión de este acuífero es de gran relevancia la investigación y monitoreo continuo de los niveles de los pozos de extracción de agua, los patrones que siguen los usuarios en su uso, entre otros aspectos técnicos relevantes para poder gestionar y conservar adecuadamente los recursos hídricos que son cada día más escasos.

## **Marco conceptual**

El municipio de Jiménez se encuentra en el Estado de Chihuahua, México. Es el tercer más extenso y se ubica en el sureste del estado, dentro del Desierto de Chihuahua que pertenece al Bolsón de Mapimí. El clima, por tanto, es extremo. En verano se alcanzan los 40-42 °C, mientras que en invierno llega a los -14°C. La temporada de calor suele durar alrededor de cinco meses (mayo a septiembre). Las precipitaciones son escasas, y pueden llegar a ser torrenciales en julio y agosto. El invierno dura alrededor de cinco

meses (INEGI, 2020). La precipitación media es de 386 mm (CONAGUA, 2020). El municipio tiene un total de 249 localidades, de las cuales las principales son José Mariano Jiménez (cabecera), Escalón, Torreoncitos y la Hacienda de Dolores.

El último censo registró un total de 40 859 personas en el municipio, con una concentración de 35 087 en la cabecera municipal (INEGI, 2020).

El territorio es plano, surcado por serranías aisladas, con una hidrografía representada por el Río Florido. Adicionalmente hay cuencas cerradas interiores formadas por lagunas intermitentes; como por ejemplo la laguna Palomas.

EL manto freático que provee de agua subterránea a la Ciudad de Jiménez, es el que abarca la cuenca hídrica Jiménez-Camargo. El acuífero Jiménez-Camargo se localiza en la porción Sur del estado de Chihuahua, y abarca un área de 9 947.7 km<sup>2</sup> (Figura 1).

Este acuífero se conforma por material aluvial en las zonas norte y sureste; rocas sedimentarias en conglomerados; en conjunto con calizas, lutitas y areniscas al norte y suroeste. En toda la zona se encuentran rocas ígneas como las riolitas y tobas.

En esta zona la vegetación es primordialmente de tipo matorral y pastizales. Sin embargo, debido a que los terrenos aluviales se encuentran parcialmente drenados, la vegetación cubre escasamente el suelo. Por ende, existe una insolación fuerte, y altas tasas de evaporación. En la zona centro del acuífero, donde se ubica la cabecera municipal, los suelos tienen primordialmente uso agrícola.

Por estas características de la zona, aunado a la precipitación media anual escasa, no se tiene una infiltración adecuada del agua al acuífero. De acuerdo a datos de la CONAGUA, la recarga vertical natural es de 173.3 hm<sup>3</sup>/año; considerando el proceso de infiltración natural y la recarga debida al exceso de riego.

La extracción de aguas reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua (CONAGUA, 2020) es de 359,939,930 m<sup>3</sup> anuales. Del mismo modo reportan, que el déficit es de 192,139,930 m<sup>3</sup> anuales extraídos utilizando el almacenamiento no renovable.

Por ende, el acuífero se encuentra en un estado de sobre explotación.

Aunado a este problema de disponibilidad, se encuentra el de calidad de agua. Se tienen reportes desde la década de los noventa, donde se dieron a conocer concentraciones superiores de arsénico a los 0.050 mg/L en este acuífero (Camacho et al. 2011).

## Figura 1

### *Acuíferos del Estado de Chihuahua*



En el 2015, estudios colaborativos entre la UACH con la Universidad de Carolina del Norte, permitieron medir la concentración en el agua de consumo en 13 municipios del Estado. Encontrando concentraciones de arsénico hasta de 0.419 mg/L, y de fluoruro de hasta 11.8 mg/L en la región de Jiménez-Camargo y Meoqui-Delicias (González-Horta et al. 2015).

El problema de disposición y de calidad del agua es bien conocido por pobladores de la Ciudad. En un comunicado efectuado al Diario de Delicias en febrero del 2020, se definió como un “foco rojo” a la cuenca hídrica Jiménez-Camargo. En la declaratoria

efectuado, se ubicaron en la ciudad de Jiménez, 1100 pozos registrados para uso agrícola y 18 pozos destinados para uso y consumo, de los cuales solo operan 13 debido a que, en los otros, los niveles de arsénico son muy altos. Declararon también que todos los pozos tienen un grado de abatimiento grande, ya que no alcanza el agua para surtir a la población.

El productor Arturo Rentería, comentó que el desabasto es mayor en la época de estiaje que comprende del mes de marzo al mes de junio. Principalmente debido a que la agricultura se mantiene exclusivamente por el uso del agua subterránea. De acuerdo a esta publicación, la Comisión Federal de Electricidad declaró que hay mil pozos registrados legalmente, donde se ven beneficiados nogaleros de origen extranjero, que dominan la región.

En otra publicación realizada en el Heraldo en enero del 2023 (Salud Ochoa, 2020), se declaró que los pozos ilegales que se han detectado por la Conagua del 2020 al 2022, son solamente 23. Sin embargo, durante el 2022, la Secretaría de Agricultura y desarrollo rural (SADER) contabilizó más de 80 ha de nogal secas, debido a la falta de agua.

Por ende, en el presente trabajo, se exponen datos del muestreo realizado durante el último semestre, por la Universidad Autónoma de Chihuahua en conjunto con los organismos operativos del agua del Estado. El 28 de junio de 2022 se firmó el Convenio entre la Universidad Autónoma de Chihuahua, La Junta Central de Agua y Saneamiento y las Juntas Municipales de Agua de Chihuahua y Ciudad Juárez, para realizar el “Inventario Estatal de Fuentes de Suministro de Agua Potable”. Ya que se requiere contar con una base sólida, fidedigna y actualizada de las condiciones de los aprovechamientos de agua potable, para la mejor toma de decisiones, respaldada siempre en información científica veraz.

En este proyecto se muestran los resultados fisicoquímicos del agua muestreada en los pozos que suministran del recurso hídrico a la población de Ciudad Jiménez, el principal objetivo fue mostrar las condiciones del agua y de caudal que presentan, así como mostrar la tecnología en espera de las condiciones hidráulicas para poder efectuar la potabilización.

## **Metodología**

Se dispuso de todo el capital humano universitario, con expertos con posgrados reconocidos y miembros del Sistema Nacional de Investigadores, estudiantes de licenciatura en un programa de servicio social con brigadas multidisciplinarias de más de 100 estudiantes debidamente capacitados, organizados y coordinados; Instalaciones, equipamiento y planta vehicular para conseguir esta base de información en un tiempo récord. Se realizaron las visitas y muestreos por cada municipio en jornadas intensivas de trabajo.

Los muestreos efectuados se llevaron a cabo en el periodo del primero de Julio de 2022 hasta el 2 de diciembre del 2022, buscando conocer las características de los aprovechamientos durante la temporada de lluvias. Se tuvieron que parar actividades por tres semanas, debido principalmente a las fuertes precipitaciones presentes en nuestro Estado.

Se visitaron aprovechamientos de agua potable, presentes en la totalidad de municipios del Estado. En particular, en el Municipio de Jiménez, se visitaron 37 pozos.

Se realizaron las visitas y muestreos en jornadas intensivas de trabajo. Al arribar a cada suministro se llevó a cabo el registro del acta de visita de campo, donde se compilo información sobre las condiciones físicas de los aprovechamientos y datos fisicoquímicos del agua muestreada. Se realizó la entrevista a cada responsable de los organismos operativos, obteniendo información relevante para la descripción de la problemática hídrica de cada región.

## **Resultados**

El muestreo se realizó en brigadas formadas por cinco personas, especialistas en el área de ingeniería, alumnos de servicio social de la Facultad de Ciencias Químicas y se tomaron las muestras de agua de acuerdo a la normativa vigente (Figura 2).

De la Ciudad de Jiménez se visitaron trece pozos (Tabla 1). Las visitas se realizaron como fue especificado en la metodología (Figura 3). Las muestras de agua presentaron un pH en un intervalo de 6.86 a 8.21. Las temperaturas variaron de 25.10 °C a 30.90 °C.

**Figura 2**

*Visita, toma de muestra y levantamiento de la cédula de visita*



**Tabla 1**

*Pozos visitados en la Ciudad de Jiménez, Chihuahua*

Nombre del pozo	Caudal medio LPS	Temperatura °C	pH
Pozo 12	7.7	25.20	8.21
Pozo 14	4.97	26.10	7.22
Pozo 10	5.1	27.00	7.40
15 B	4.8	28.10	7.49
Pozo 11	6	26.10	7.40
P-9	27	29.10	7.49
Pozo 6	5.88	26.80	7.40
8	10.6	30.90	7.58
P-5	20	25.40	7.31
A	2.81	28.40	7.85
B	15	26.30	7.49
P-3	6.8	25.60	6.86
P-4	13	25.10	7.22

## Figura 2

*Muestreo en la Ciudad de Jiménez. Filtros para remoción de arsénico*



## Discusión

Como se observa de los datos recabados de caudal, existen pozos con flujos muy bajos (menos de diez LPS), lo cual es indicativo del abatimiento de las fuentes de agua subterránea. En particular, el caso del pozo número 8. En este aprovechamiento, en el año 2003 se colocaron filtros de adsorción para la remoción de Arsénico del agua (Figura 2). Sin embargo, no han podido operarse por los bajos caudales registrados. Los filtros operan por arriba de los 15 LPS. La situación de baja calidad del agua se ha visto agravada con las extremas sequías y altas temperaturas de la región. Los niveles de contaminantes como el arsénico y fluoruro han aumentado sobre los límites máximos permisibles (por publicarse). Esto hace que las tecnologías de remediación sean cada vez más necesarias, aplicadas a gran escala.

Debido al uso indiscriminado agrícola, la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo ha disminuido drásticamente, afectando el estrés hídrico del acuífero. Por ende, la toma de decisiones para la adecuada gestión de este recurso, es de extrema urgencia. La investigación y evidencias de la misma permitirán que las autoridades

resuelvan en torno a la problemática existente de inadecuadas prácticas en el uso del recurso hídrico en esta región.

## **Conclusiones**

Actualmente Ciudad Jiménez se abastece por 13 pozos operativos, los cuales van perdiendo su eficiencia en caudales, debido al uso excesivo del recurso hídrico subterráneo, en el cultivo del nogal. El consumo promedio de éste es de 6980 Litros por kilogramo, cantidad que puesta en contraste con otros cultivos, como la manzana que utiliza 400; es excesiva. Los esfuerzos para mejorar la calidad del agua, que se han cristalizado no han sido operativos, debido al abatimiento o inexistencia del pozo proyectado. En términos de lo comunicado por pobladores de la región, cada vez que se enciende un pozo que riega los nogales, todos los pozos en la comunidad disminuyen sus niveles. En este sentido, la población se encuentra en un estado de probable desaparición. La acción ciudadana debe ser inmediata y en coalición con el sector agrícola; girando hacia opciones que garanticen el acceso al agua de calidad.

## **Bibliografía**

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Estadística Jiménez: Panorama sociodemográfico de Chihuahua. Censo de Población y Vivienda 2020. (pp. 84-85). Recuperado el 24 de julio de 2021.
- Subdirección general técnica de gerencia de aguas subterráneas, CONAGUA. (diciembre 2020). Acuífero de Jiménez: Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Jiménez Camargo (0832), Estado de Chihuahua. Ciudad de México, México.
- Camacho, L. M., Gutiérrez, M., Alarcón-Herrera, M. T., Villalba, M. L., & Deng, S. (2011). Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and Southwestern USA. *Chemosphere*, 83, 211-225.
- González-Horta, C., Ballinas-Casarrubias, L., Sánchez-Ramírez, B., Ishida, M. C., Barrera-Hernández, A., Gutierrez-Torres, D., ... Del Razo, L. M. (2015). A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua,



Uso indiscriminado del recurso hídrico por el sector agrícola y afectación en el abastecimiento urbano (Cd. Jiménez, Chihuahua)

México. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 4587-4601.

Salud Ochoa/El Diario de Chihuahua. (24 de febrero 2020). Jiménez, en riesgo por falta de agua.

Rodríguez, G. (2023). Acueducto mejoraría la calidad del agua. *El Heraldo de Chihuahua*.

# **PERSPECTIVAS SOCIALES DE LA CALIDAD DEL AGUA EN ZIMAPÁN-HIDALGO**

Mónica Nayeli Velasco-Estudillo

Jaqueline Reséndiz

Leydi Diana Morales Díaz

## **Resumen**

El objetivo es presentar algunas de las perspectivas sociales bajo las cuales analizamos el problema de la calidad del agua en Zimapán-Hidalgo a fin de proponer soluciones colaborativas que contribuyan a asegurar el derecho humano al agua potable y al saneamiento. El marco de análisis para comprender la problemática en Zimapán, Hidalgo son la perspectiva de la ecología de la práctica social, psico-ambiental, transparencia e innovación social, y del derecho humano al agua, saneamiento e higiene. Se describen algunos resultados previos, y se discuten los siguientes pasos de la investigación.

**Palabras clave:** derecho humano al agua, percepción del riesgo, ecología de la práctica social.

## **Introducción**

El objetivo del siguiente texto es presentar algunas de las perspectivas sociales bajo las cuales analizamos el problema de la calidad del agua en Zimapán-Hidalgo a fin de proponer soluciones colaborativas que contribuyan a asegurar el derecho humano al agua potable y al saneamiento. El ser humano depende del agua para subsistir, pero también

para su bienestar, es decir, para posibilitar el desarrollo de una vida digna, condición previa para la realización de otros derechos humanos, como el derecho a la vida, a un nivel de vida adecuado, a la vivienda y a la alimentación (Martínez y de Felipe, 2013).

Tan sólo el 39.2% de la población de Hidalgo tiene acceso diario al agua potable, mientras que el 60.8% no tiene acceso diario; y 6.67% de la población de Hidalgo ha fallecido por agua insalubre, saneamiento deficiente o falta de higiene (INEGI, Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental. 2013, 2015, 2017, 2019 y 2022). Aunque 56.1% de la población de Hidalgo está satisfecha con el servicio de agua potable, se desconoce el grado en que la población general conoce y está consciente sobre la calidad del agua y los efectos en su salud (INEGI, 2013, 2015, 2017, 2019 y 2022). La mayoría de la población está parcial o muy involucrada en temas de cultura del agua debido al estrés hídrico de la región; sin embargo, aún no toda la población ha tomado las precauciones necesarias para el consumo de agua potable y las medidas de salud pertinentes.

### **El consumo de agua contaminada**

En México, existen zonas consideradas como regiones de emergencia ambiental por las altas concentraciones de arsénico y flúor que se encuentran en el agua subterránea y superficial, entre ellas destacan, la zona conocida como Comarca Lagunera, Chihuahua, Guanajuato, Durango y la zona minera de Zimapán (Armienta, Segovia, 2008). En el municipio de Zimapán, los cuerpos de agua subterráneos han sido estudiados desde hace tiempo debido a problemas presentados, particularmente, por la contaminación de arsénico en aguas subterráneas (Flores, Armienta y Valladares, 2009). Por ejemplo, en 1992 se analizaron 34 fuentes que suministraban agua, como pozos, norias y manantiales, los resultados de estos análisis tuvieron variaciones considerables, algunas fueron inferiores al límite de detección, es decir, menores a 0.014 mg/l y otras presentaron concentraciones de hasta 1.12 mg mg/l. De estas muestras, quince reportaron concentraciones superiores a 0.014 mg/l y de las quince, nueve se reportaron superiores a la norma oficial mexicana (Armienta y Rodríguez, 1996). Por consiguiente, el agua que ingiere la población como agua potable en Zimapán Hidalgo no tiene la calidad que exige la normatividad vigente (Flores, Armienta y Valladares, 2009).

A fin de conocer el estado de salud de la población expuesta a este tipo de contaminación se realizaron análisis al cabello y uñas de algunos pobladores de la zona, que vivían cerca de los pozos contaminados. Los resultados mostraron altas concentraciones de arsénico en los participantes (Armienta et al., 1997). El arsénico es una de las 10 sustancias químicas que la OMS considera más preocupantes para la salud pública está presente en el agua subterránea como resultado de lixiviación de relaves mineros, disolución de residuos ricos en arsénico deposición de fundición de partículas y la subsiguiente infiltración y disolución de minerales naturales que contienen arsénico presente en el acuífero (Armienta et al., 2001; Munguía, Hernández y Martínez, 2023).

La exposición crónica al arsénico ha sido reconocida mundialmente como una preocupación ambiental relacionada con la salud debido a la contaminación generalizada y su asociación con numerosas enfermedades como afecciones al sistema gastrointestinal, hipotensión severa, lesiones en la piel, neuritis periférica, desviaciones del electrocardiograma normal y trastornos relacionados con la circulación periférica, como la gangrena de extremidades o enfermedad de pies negro, cáncer de piel y pulmón así como convulsiones, coma y la muerte (Armienta y Rodríguez, 1996; Rodríguez, 2021; Medina-Pizzali, Robles, Mendoza y Torres, 2018; Munguía, Hernández y Martínez, 2023).

## **Marco teórico**

El problema se ha analizado a nivel geológico, de potabilización y saneamiento; pero requiere un entendimiento más profundo de la interacción social-institucional, por lo que se propone una serie de perspectivas sociales complementarias que exploramos a continuación: perspectiva de la ecología de la práctica social, psico-ambiental, transparencia e innovación social, y del derecho humano al agua, saneamiento e higiene.

### *Perspectiva de la ecología de la práctica social*

La perspectiva de la ecología de la práctica social se fundamenta en la teoría de sistemas, la teoría de agencia basada en la práctica espacial, la fenomenología y la teoría constructivista (Hernández Romero, Alejandro Ramos y Pineda Muñoz, 2022; Lara-

Rosano, 2017). Se analizan elementos de la ecología de la práctica social aprendidos en enero de 2022 del taller *The Ecology of Social Practice* brindado por la asociación *Designing for Democracy*<sup>1</sup>.

La perspectiva estudia las vivencias de la comunidad en un contexto espaciotemporal que considera tres aspectos principales: a) pedagogía (percepciones y modelos mentales), b) procesos (relaciones, conexiones, y dinámicas de poder), y c) práctica espacial (políticas, prácticas e inversiones). El contexto brinda la estructura en la que se desarrollan las vivencias de los sujetos (historias, narrativas, relaciones entre los actores), que exhorta a examinar los actores con relación a los hitos, los puntos de acceso (a los recursos e información clave), y los factores de influencia. Las herramientas de la práctica social espaciotemporal facilitan el involucramiento de la comunidad; así como, la sostenibilidad de las iniciativas.

### *Perspectiva psicoambiental*

Desde la perspectiva psicológica, se aborda el tema de percepción de riesgo, como inicio para evaluar y distinguir las distintas variables psicológicas implicadas en estos problemas. Una de las variables relacionada con problemas de estas características es la percepción de riesgos, que difiere en gran medida del riesgo observable y medible; ya que, en ella intervienen distintos factores sociales, culturales y ambientales, que contribuyen a su aumento o disminución (Michel-Guillou y Meur-Ferec, 2016).

Por lo que, ante el diseño de estrategias de intervención, es necesario recurrir a la exploración de percepciones, creencias y conocimientos con los que cuenta la población. Y una vez determinadas las estrategias de intervención, también será importante tomar en cuenta aspectos psicológicos para dar seguimiento y propiciar una apropiación de estas estrategias que permitan mantenerlas a largo plazo (Tobias y Berg, 2011).

---

<sup>1</sup> Brochure de la ONG Designing-For-Democracy-Brochure.pdf (trahanarchitects.com)

### *Perspectiva de la transparencia e innovación social*

Durante nuestra experiencia identificamos la falta y necesidad de brindar información oportuna a la población sobre la calidad del agua y el saneamiento en comunidades prioritarias con alta exposición a contaminantes peligrosos para la salud. La transparencia toma sentido ante la rendición de cuentas y el combate a la corrupción (Vera, Martínez y Marcelino, 2019). En colaboración academia-sociedad civil entre el Inventario Nacional de Calidad del Agua, Cántaro Azul y Fanmex se generó una plataforma [www.aguaenesuelas.mx](http://www.aguaenesuelas.mx) para difundir la calidad del agua en las escuelas a nivel nacional. La plataforma dirigida a la comunidad escolar y entidades públicas explica los indicadores y promueve la acción basada en evidencia. Comprendemos que el acceso y la comprensión de la información por parte de la población requiere del esfuerzo conjunto entre académicos, investigadores, el gobierno y la ciudadanía. Las iniciativas de la innovación pública del gobierno abierto se complementan con las iniciativas de innovación social y el conocimiento generado por la comunidad técnico-científica.

Byung-Chul Han (2016, 2022) nos indica que la *transparencia* y accesibilidad de la información no basta ante la llamada *infocracia*. Consideramos que parte de la comprensión y solución del problema requerirá la participación de la comunidad, asociaciones civiles, la colaboración interinstitucional, a la par del intercambio de conocimiento técnico-práctico, el desarrollo de capacidades, y la intervención en la ecología de la práctica social.

### *Perspectiva del derecho humano al agua, saneamiento e higiene*

La perspectiva legal considera la legislación internacional, nacional, estatal y municipal colocando como eje al agua y al saneamiento como un derecho humano y las acciones institucionales encaminadas a asegurar este derecho. El agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos, así como para el desarrollo y el medio ambiente, es un recurso finito y vulnerable la gestión eficaz de los recursos hídricos. Requiere un enfoque integrado que concilie el desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas naturales (Declaración de Dublín, 1992; Dourojeanni, 1994; Dourojeanni, Jouravlev y Chávez, 2002; CNDH, 2014).

El acceso a servicios inadecuados de agua, saneamiento e higiene tienen consecuencias importantes para asegurar la salud o la enfermedad de una población, no solo favorece el desarrollo, sino que también les proporciona un comienzo más saludable en la vida (OPS, 2023; UNICEF, 2023). Se debe garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos según lo dispuesto en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.1.

El desarrollo local se considera como un proceso de crecimiento económico y de cambio estructural que conduce a una mejora en el nivel de vida de la población local (Boiser, 2022). De acuerdo con Sierra (1998), el municipio es el organismo encargado de gestionar el bien común local al:

- a) administrar, fomentar y proteger los intereses locales,
- b) promover el desarrollo integral de sus circunscripciones territoriales,
- c) preservar los recursos naturales y el medio ambiente, y
- d) promover la prestación adecuada de los servicios públicos y sociales locales.

Por ende, la satisfacción de las necesidades primordiales de la población es posible a través de fortalecer la autonomía municipal; asegurar la participación ciudadana en el proceso de toma de decisiones, así como promover el desarrollo comunitario.

Los gobiernos deben garantizar que todo el mundo tenga acceso al agua, se deben adoptar leyes, políticas y programas adecuados y garantizar los recursos y sistemas de control necesarios (Colmenares, 2020). Tomar en consideración asegurar la participación ciudadana en el proceso de toma de decisiones, así como promover el desarrollo comunitario, la satisfacción de las necesidades primordiales de la población es posible a través de fortalecimiento de la autonomía municipal.

Las perspectivas anteriores concilian las vivencias, percepciones e historia de la comunidad con su relación y significación del agua, con los factores de influencia y el marco institucional que regula el Estado de Derecho, el acceso a la información y la aplicación de la normatividad relacionada al agua y saneamiento.

## **Metodología**

El nivel de análisis es macro, meso y micro. A *nivel macro* se analiza el marco legal internacional y nacional de agua saneamiento, así como el acceso a la información de datos de calidad del agua a nivel nacional. A *nivel meso* se analiza el marco legal, las acciones institucionales, así como los elementos de la ecología de la práctica social antes mencionados en la comunidad de Zimapán, Hidalgo. Y a *nivel micro* se analizan las narrativas, los comportamientos, los sesgos cognitivos, y las percepciones de riesgo de los habitantes.

La metodología integradora es la investigación-acción participativa que permite la riqueza del intercambio de la información cuantitativa (cuestionarios de percepción de riesgo, conocimiento sobre el derecho humano al agua y acciones emprendidas), cualitativa (narrativas de la comunidad, entrevistas y grupos foco), y documental (fuentes secundarias, estudios previos, bases de datos, otros).

El análisis de la información se genera de manera multidisciplinaria; sin embargo, las estrategias de acción se plantean de manera participativa junto con otros actores clave de organizaciones civiles como Transitando Hacia la Sustentabilidad, funcionarios públicos, estudiantes, investigadoras, empresarios, y población interesada en la problemática.

## **Resultados previos**

La investigación sobre la calidad del agua desde la perspectiva técnico-científica de las ciencias duras han facilitado no sólo el conocimiento de la problemática, sino la colaboración de las autoridades municipales. Uno de los resultados de la interacción ha sido el posicionar el tema, la construcción y operación de la planta de tratamiento de agua potable Aurora Armienta. El Plan Municipal de Desarrollo de Zimapán 2020-2024 considera atender y solucionar el abasto del agua en concordancia con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.1 “Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos”.

El abasto de agua prioridad, ya que el suministro insuficiente de este vital líquido incide negativamente en todas las políticas sectoriales por lo que nuestras acciones estarán



encaminadas a dar solución a este grave problema en esta administración (Ayuntamiento de Zimapán, 2021).

Se ha detectado que la población hidalguense, en general, es participativa con relación a la problemática del agua debido a la relevancia para todas las actividades económicas y del uso doméstico. A pesar de que la estadística de participación cívica en Hidalgo es baja (2.9%) según la Encuesta Nacional de Cultura Cívica (INEGI, 2020), un análisis documental (de las publicaciones sobre temáticas relativas al agua en el periódico “El Sol de Hidalgo”) muestra una serie de participaciones en la defensa del agua, movilizaciones masivas, consultas ciudadanas y la inquietud por informarse en el tema. La participación se intensifica ante la falta de agua.

¿Podríamos esperar el involucramiento de la comunidad?, ya sea mediante contraloría social, activismo político, ciudadanía 2.0, acciones de transparencia u otras iniciativas. Es posible que la desconfianza de la población en las instituciones dificulte el diálogo directo con las autoridades. De acuerdo con la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental ENCIG, de INEGI, ediciones 2019 y 2021, en Hidalgo se detectó una alta desconfianza hacia los partidos políticos en un 69%, seguido por los políticos (63%), Ministerio Público (58%), cámara de diputados y senadores (57%) y los jueces y magistrados (53%). Por otro lado, los encuestados respondieron guardar confianza hacia círculos cercanos como familiares (85%) y compañeros de trabajo (79%); las universidades y escuelas públicas (83% y 79%), el ejército y la marina (71%). En nuestra experiencia, el involucramiento de las científicas y académicas ha sido primordial junto con las asociaciones civiles y grupos base.

Tras haber aplicado 45 entrevistas semiestructuradas y con Zimapenses de las regiones de Detzani, Muhi y Llano Norte. Se ha identificado que los participantes prefieren comprar agua embotellada, porque no confían en el agua del municipio. La mayoría de los participantes no utiliza ningún método de purificación de agua en casa. Las mujeres son en su mayoría las encargadas del cuidado del agua en casa. No existen conocimientos claros sobre el arsénico, pero lo relacionan con enfermedades como el cáncer.

Además, se identificaron sesgos cognitivos de invulnerabilidad ante el riesgo de salud por exposición al contaminante (Rohrmann, 1998; Sjöberg, 2000); pero sí relacionan el arsénico con las enfermedades y la muerte, aunque reportan no tener experiencias negativas al respecto. Algunas personas consideran que la contaminación ocurre en

lugares alejados de sus viviendas denominado *sesgo espacial* por vincular la distancia al riesgo por exposición (Glifford, et al. 2009).

Estos resultados no se han correlacionado con el nivel educativo; sin embargo, de acuerdo con datos de los censos del INEGI, el nivel educativo medio es de 9.4 años de promedio escolar; es decir, a nivel secundaria, y se presenta una deserción escolar relativamente baja del 14.6% (OCDE, 2020). Las condiciones de pobreza (50.8%), pobreza extrema (8.1%), inseguridad alimentaria moderada o severa en 22.7%; y la violencia hacia las mujeres (65.51% de mujeres de 15 años y más ha padecido violencia a lo largo de su vida) son factores de influencia relevantes que afectan el comportamiento esperado de cuidado de la salud y atención a la calidad del agua. Además, según datos de CONEVAL (2016-2018), 26.9% no cuentan con acceso a los servicios de salud (2020). Se añade la falta de protocolos para detectar y monitorear los efectos de arsenicismo y fluorosis.

Se han mapeado los puntos de acceso y los actores clave, el siguiente paso será validar el uso de estos puntos por los actores, así como las redes entre los mismos. Igualmente, se identificaron los activos locales y externos para la atención a la problemática entre los cuales destaca el compromiso de Instituciones de Educación Superior, organizaciones de sociedad civil, empresarios, investigadores, y autoridades locales; así como el entendimiento profundo del problema a nivel técnico-científico.

A nivel institucional, el compromiso de las autoridades municipales se ha reflejado en la rehabilitación de la planta potabilizadora María Aurora Armienta; y el compromiso de mantener en estado óptimo los tanques depósito de todas las comunidades y dotar de estos en aquellas localidades que haga falta.

### **Discusión y conclusiones (*pasos siguientes y análisis*)**

Algunos de los retos identificados son las voces silenciadas en un contexto de violencia donde 65.51% de mujeres de 15 años y más ha padecido violencia a lo largo de su vida, de acuerdo con datos de CONEVAL (2016-2018). El rol de la mujer en el agua es esencial, por lo que se hace necesario tomar en cuenta el contexto mencionado. Hacen falta igualmente, cronistas locales que den cuenta de los hitos, por lo que se acudirá con otros actores clave para nutrir el mapeo social. Asimismo, las acciones para la atención y

el seguimiento a la salud pública; así como sensibilización a la población general. Se han detectado retos institucionales como los siguientes:

1. Presupuesto restringido que incentiven acciones del cuidado del medio ambiente y el capital natural, y su aprovechamiento sostenible.
2. Escasa colaboración interinstitucional y falta de una estrategia de saneamiento de aguas residuales.
3. Falta de suministro de agua en la mayoría de las localidades y comunidades del municipio.
4. Ausencia de una cultura del agua que permita la captación del agua pluvial y el consumo racional agua.

Además, de los retos se han identificado iniciativas potenciales de captación de agua de lluvia, involucramiento de las comunidades escolares, educación ambiental para la cultura del agua, campañas de prevención, programas de responsabilidad corporativa, empoderamiento de la juventud y de la mujer, e iniciativas artísticas. Sin embargo, la escasez de recursos y convocatorias han detenido los avances de estos proyectos.

## **Bibliografía**

- Armienta, M.A. & Segovia, N. (2008) Arsenic and Fluoride in the Groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30, 345-353. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-008-9167-8>
- Armienta, M.A., Villaseñor G., Rodríguez, R., Ongley L.K, & Mango, H. (2001). The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapan Valley, Mexico. *Environmental Geology* 40 (4-5).
- Armienta M.A., Rodríguez R., Aguayi A., Cenicerros N., Villaseñor G., & Cruz O. (1997). Arsenic contamination of groundwater at Zimapan, México. *Hydrogeology Journal*, 5(2):39-46.
- Armienta, M. A., & Rodríguez, R. (1996). Arsénico en el Valle de Zimapán, México: problemática ambiental. *Rev. MAPFRE Seguridad*, 63, 33-43.
- Colmenares Nataren, J. G. (2020). *Evaluación de la gestión de la reserva de la biósfera el Triunfo* (Master's thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas).

- CONEVAL (2016-2018). OCDE. Encuesta Nacional sobre la Dinámica de las Relaciones en los Hogares. MCS-ENIGH.
- Declaración de Dublín, (1992). Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente: El desarrollo en la perspectiva del Siglo XXI, 26-3 1 de enero de 1992, Dublín, Irlanda.
- de Luis Romero, E., Fernández Aller, M. C., & Guzmán Acha, C. (2013). Derecho humano al agua y al saneamiento: derechos estrechamente vinculados al derecho a la vida. *Documentación social*, 170, 217-236.
- Dourojeanni, A.; Jouravlev, A. y Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica, *CEPAL*, Serie Documentos de Trabajo - Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad No. 1, URI <https://hdl.handle.net/11362/1447>
- Dourojeanni, A. (1994). La gestión del agua y las cuencas en América Latina, *Revista CEPAL*, 53. URI <https://hdl.handle.net/11362/11953>
- Flores, E., Armienta, A., Micete S., y Valladares, M. (2009). Contenido de Arsénico: Estudio de un Caso en Zimapán Hidalgo-México, *Información Tecnológica*, 20(4): 85-93. DOI. 10.1612/inf.tecnol.4098it.08
- Gifford, R., Scannell, L., Kormos, C., Smolova, L., Biel, A., Boncu, S., ... & Kaiser, F. G. (2009). Temporal pessimism and spatial optimism in environmental assessments: An 18-nation study. *Journal of environmental psychology*, 29(1), 1-12.
- H. Ayuntamiento de Zimapán, Hidalgo (2021). *Plan Municipal de Desarrollo 2020-2024*. Publicado el 12 de junio del 2021. Sustraído de <http://planestataldedesarrollo.hidalgo.gob.mx>
- Han, Byung-Chul. (2022). *Infocracia*. Editorial Taurus. México. ISBN-10:6073812817. ISBN-13: 978-6073812818.
- Han, Byung-Chul. (2016). *La Sociedad de la Transparencia*. Editorial Herder. México. ISBN-10: 8425432529. ISBN-13: 978-8425432521.
- Hernández Romero, Y., Alejandro Ramos, G., y Pineda Muñoz, J. (2022). Análisis y configuración del desarrollo regional. Un enfoque desde los actores. *Espacios Públicos*, 15(34). Consultado de <https://espaciospublicos.uaemex.mx/article/view/19747>
- INEGI. (2022, 2019, 2017, 2015 y 2013). Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental, INEGI. Sustraído de [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx)

- INEGI. (2021). Encuesta Nacional de Cultura Cívica. ENCUCI. 2020. INEGI. Sustraído de [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx)
- Lara-Rosano, F.J. (2017). *Fundamentos para el diagnóstico e intervención en sistemas complejos: metodología para el análisis de la complejidad sociales*. Editorial Académica Española: USA. ISBN-10: 620224514X. ISBN-13: 978-6202245142.
- Lemus, J. J. (2019). *El agua o la vida: otra guerra ha comenzado*. Editorial Penguin Random House. ISBN-10: 6073179510. ISBN-13: 978-6073179515.
- Martínez, A. N., & de Felipe, O. E. (2013). Derecho humano al agua y control de convencionalidad. *Derecho PUCP*, (70), 105-120.
- Michel-Guillou, E., & Meur-Ferec, C. (2016). Representations of coastal risk (erosion and marine flooding) among inhabitants of at-risk municipalities. *Journal of Risk Research*, 20(6), 776-799. DOI 10.1080/13669877.2015.1119181ff. hal-01521650f
- Munguía-Lara A.; Hernández-Martínez, L. y Martínez Villegas, N. (2023). Arsénico en el agua potable en México. *Elementos*, 129: 19-23.
- OCDE. Censo General de la Población y la Vivienda 2005, 2010 y 2015 del INEGI.
- OCDE. Sistema Nacional de Información Estadística Educativa e Indicadores Pronósticos Educativos de la SEP.
- Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., y Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35, 93-102.
- Rodríguez Padilla, C. (2021). Intoxicación por arsénico. *Medicina Legal de Costa Rica*, 38 (2): 4-16. Recuperado el 13 de marzo de 2023, de [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152021000300004&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152021000300004&lng=en&tlng=es)
- Rohrmann, B. (1998). The risk notion: epistemological and empirical considerations. *Integrative risk assessment*, 39-46
- Sjöberg, L. (2000). Factors in Risk Perception. *Risk analysis*, 20(1), 1-11.
- Sierra, Juan Enrique (1998), *El municipio en América Latina y el Caribe (estructura, funcionamiento y estadísticas básicas)*, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), LC/IP/L.152, 13 de octubre, Santiago de Chile.

- Tobias, R. & Berg, M. (2011). Sustainable Use of Arsenic-Removing Sand Filters in Vietnam: Psychological and Social Factors, *Environmental Science & Technology*, 45 (8), 3260-3267. DOI: 10.1021/es102076x
- Valdés de Hoyos, E. I. P., & Uribe Arzate, E. (2016). El derecho humano al agua. Una cuestión de interpretación o de reconocimiento. *Cuestiones constitucionales*, (34), 3-25.
- Vera Martínez, M.C.; Martínez Rodríguez, M.C. & Marcelino Aranda, M. (2019). Transparency, Accountability and Access to Information: Limits and Scope of the National Anticorruption System in Mexico. *Public Policy and Administration*, 18(4). <https://doi.org/10.13165/VPA-19-18-4-12>

# **MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL ARROYO ARENA EN SANTA MARÍA HUATULCO**

Tania Gutiérrez-Macías  
Graciela Flores Hernández  
Juan Gabriel García Maldonado  
Petia Mijaylova Nacheva

## **Resumen**

En la localidad de Santa María Huatulco, Oaxaca, se encuentra ubicado el arroyo Arena, el cual se abastece principalmente de un manantial de tipo intermitente y de agua de lluvia en las temporadas de verano y otoño. Es considerada la principal fuente de abastecimiento de agua para la fauna silvestre de la zona, y a su paso crea un micro-hábitat, refugio para diversas especies. Aguas abajo, la población utiliza el arroyo Arena para realizar actividades recreativas en el agua con contacto directo y finalmente esta se descarga en la playa Boca Vieja, considerada como una zona turística importante en Huatulco. Con el paso de los años se han identificado descargas de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) a lo largo del cauce, por lo que se han observado afectaciones a biodiversidad, contaminación de suelo, pozos y playas. Por tal motivo el objetivo del presente trabajo fue el monitoreo de parámetros de calidad del agua a lo largo del arroyo Arena. Se monitorearon parámetros indicadores de la calidad del agua durante dos temporadas (sequía y lluvia). Como resultado se observó que el arroyo es afectado por la PTAR que descarga de manera directa en el km 2.5 y se observaron concentraciones promedio de 150 mg/L de DQO y concentraciones de 1,800 NMP·100/mL de coliformes fecales.

En conclusión, se observó que en los puntos de monitoreo posterior la PTAR algunos parámetros como los coliformes fecales aumentaron, generando una contaminación en el arroyo Arena.

**Palabras clave:** arroyo, aguas residuales, materia orgánica.

## **Introducción**

Las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales debida a la conformación del relieve (CONAGUA, 2018). De acuerdo con Burgos et al (2015), las cuencas hidrográficas están delimitadas por parteaguas (divisoria de aguas) y niveles de base locales o generales. El principal elemento integrador de una cuenca hidrográfica es el agua; todo lo que ocurre en su territorio repercutirá en la cantidad, calidad y temporalidad de los recursos hídricos (Brooks et al., 2020; Cotler, 2010). La cuenca es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos, entre otras cosas, porque en ella los sistemas físicos y bióticos y el sistema socioeconómico son interdependientes y se encuentran interrelacionados (Cotler 2010). De acuerdo con INEGI, INE Y CONAGUA, el país cuenta con 1,471 cuencas, las cuales presentan una enorme variabilidad en tamaños: de miles a un kilómetro cuadrado. La región hidrológica (RH) No. 21 de la Costa de Oaxaca, se localiza al sur del país tiene una extensión territorial continental de 10,514 km<sup>2</sup>, se encuentra completamente dentro del estado de Oaxaca y abarca el 10.61% de la superficie de la entidad, la precipitación normal anual para los años 1981-2010, fue de 951 mm, el escurrimiento natural medio superficial interno de 2,894 hm<sup>3</sup>/año, el escurrimiento natural medio superficial total de 2,894 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2018). En general, los ríos de esta cuenca ofrecen balance hidráulico positivo, debido al intenso régimen de lluvias que la temporada ciclónica propicia en el área, el principal uso del agua en la cuenca es el doméstico, le siguen en importancia el agrícola, industrial, pesca y actividades recreativas (INEGI, 2010). Dentro de la RH No 21 se encuentra la cuenca hidrográfica río Huatulco-Coyula, la cual tiene un volumen disponible a la salida de 512 millones de metros cúbicos. El volumen disponible comprende desde el nacimiento de los ríos Coyula, Cuajinicuil y el arroyo Súchil, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. La cuenca hidrográfica río Coyula, drena una superficie de 649 Km<sup>2</sup> y se encuentra delimitada al norte por la

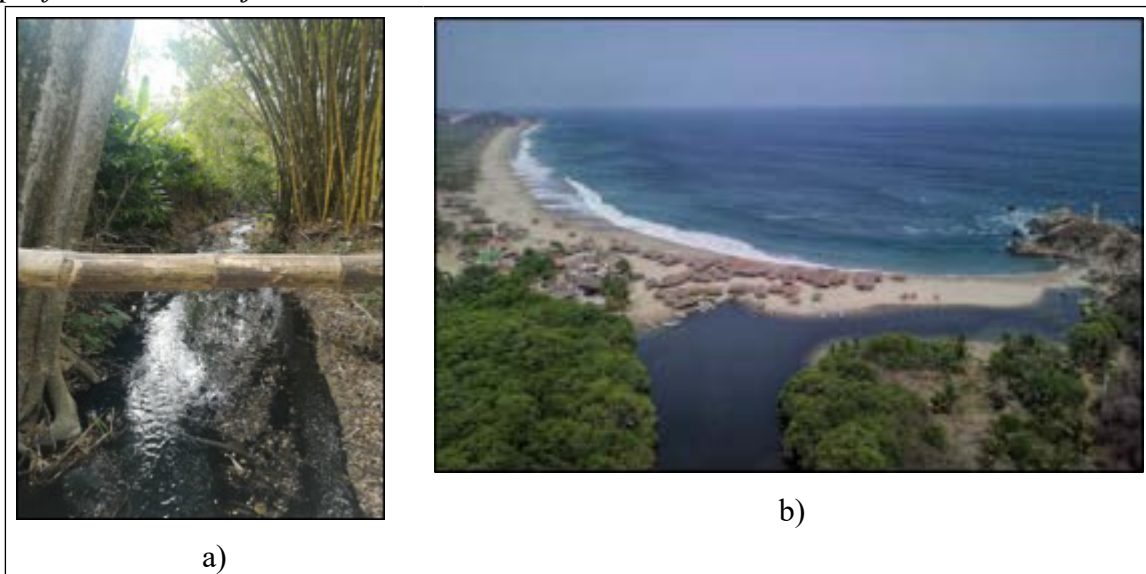


cuenca hidrológica río Copalita 1, al sur por el océano pacífico, al este por la cuenca hidrológica río Copalita 2 y al oeste por las cuencas hidrológicas río Tonameca 1 y río Tonameca 2. La conformación hidrológica de Huatulco corresponde a cuencas de tamaño medio que incluyen ríos considerados como perennes (Cuajinicuil-Suchitl, Todos Santos, Cacaluta, Tangolunda entre otros) (González, 1996), sin embargo, su caudal hoy en día no es suficiente para permanecer todo el año. El sistema hidrológico de Huatulco está constituido de redes de drenaje dendríticos y sub-dendríticos bien desarrollados, donde la disponibilidad de agua está dada por los escurrimientos que bajan de las montañas medias (600 a 1,200 msnm) donde se originan las lluvias orográficas de la costa de Oaxaca. Debido al tipo de sustrato geológico que conforma la región, la infiltración dentro del sistema de drenaje es muy baja y se caracteriza por presentar cuencas de tipo intermitente, con mucha susceptibilidad a la erosión (CONANP, 2003).

En los últimos años el escurrimiento superficial de la microcuenca del arroyo Arena se ha observado con coloración negra debido a las aguas residuales sin tratamiento que son vertidas en su cauce. El arroyo cuenta con una longitud de 6 km hasta que se une al río Todos Santos que avanza aproximadamente 4 km más hasta llegar a unirse con el río Limón-Coyula. Finalmente, el escurrimiento superficial de la cuenca avanza otros 9 km al sur hasta desembocar en la playa Boca Vieja Coyula, Huatulco (Figura 1).

**Figura 1**

a) *Escurrimiento superficial del Arroyo Arena* b) *Desembocadura final del escurrimiento superficial Boca vieja en Santa María Huatulco, Oaxaca*



De acuerdo a INEGI (2020), la población que habita en el municipio de Santa María Huatulco es de 45,680 habitantes. Sin embargo, en temporadas vacacionales, los habitantes son superados en número por los turistas (Talledos, et al., 2019) en una proporción de más del doble. En la actualidad los turistas no solamente ocupan el llamado desarrollo turístico, Bahías de Huatulco, también se ha observado un aumento de turistas en las zonas rurales y principalmente en el centro de la cabecera municipal de Santa María Huatulco, turistas que buscan conocer lo auténtico de un lugar y el modo de vida de los habitantes locales. Así la oferta de servicios en Huatulco se ha ampliado, permitiendo a la población nativa del municipio, ofrecer servicios turísticos en sus propias viviendas o parcelas. Esta zona es una de las más activas para la dinámica turística, que genera una gama socioeconómica muy importante en la parte sur del país y del estado de Oaxaca, lo que motiva que su crecimiento socioeconómico demande una mayor cantidad del recurso agua y como consecuencia su contaminación, lo cual agrava los problemas sobre el uso y la disponibilidad del vital líquido en dicha región hidrológica, por lo que es necesario propiciar su aprovechamiento integral, uso eficiente, manejo adecuado, distribución equitativa y coadyuvar a alcanzar un desarrollo sustentable. Por tal motivo este estudio tiene como objetivo el monitoreo de parámetros de calidad del agua a lo largo del arroyo Arena.

## Marco teórico

La flora de la cuenca hidrográfica río Huatulco-Coyula, se caracteriza por presentar en su mayor parte vegetación de selva baja caducifolia, así como vegetación de bosque de galería a las orillas del escurrimiento superficial y selva mediana subperenifolia, este tipo de vegetación se desarrolla básicamente en las pequeñas cañadas en las que la humedad relativa es mayor, tanto en los suelos como en el aire (Salas-Morales et al., 2007). Algunas cañadas mantienen una pequeña corriente de agua durante más tiempo que los arroyos, cuyo lecho se encuentra más expuesto a la intemperie. La región Costa de Oaxaca ha sido destacada como un área de importancia para la conservación biológica por lo que se han realizado estudios en la microcuenca del río Cacaluta, en donde a partir de modelos coremáticos ponen en evidencia la importancia estratégica para la conservación de la riqueza natural de la región (Cué-Bär et al., 2006; Salas-Morales et al., 2007). Meave et al. (2012) reportaron un total de 736 especies de plantas en el municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca. A pesar del grado de conservación de las cuencas Copalita-Zimatán-Huatulco, se han identificado amenazas como factores de deterioro ambiental las cuales han sido calificadas como prioritarias como lo son: la deforestación, los incendios, el avance de la frontera agrícola, la disminución de la disponibilidad del agua, el arrastre de sedimentos a la zona costera, las prácticas turísticas desordenadas y la contaminación del agua (González-Mora et al., 2009). Además, dentro del municipio de Santa María Huatulco existen zonas de reserva las cuales corresponden al Parque Nacional Huatulco con una superficie terrestre de 6,375 ha y al Sistema Comunal de Áreas Protegidas con 8,129 ha (Meave et al., 2012).

En el área de estudio se han reportado investigaciones con respecto a la contaminación de la zona, tal es el caso de Retama et al., (2016), quienes realizaron un monitoreo para evaluar la concentración de metales traza lixiviables presentes en las playas del municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca. Para el estudio colectaron 38 muestras de sedimentos y como resultado obtuvieron que los patrones de concentración de Fe, Mn, Cr y As promedio, se presentaron enriquecidos, concluyendo que dichas concentraciones fueron debidas al intemperismo de la roca madre y al ensamble mineral, más que por actividades antropogénicas. Sin embargo, otras asociaciones de metales traza lixiviados, indicaron que podrían también provenir de lodos del drenaje local. Villalobos-Hiriart et

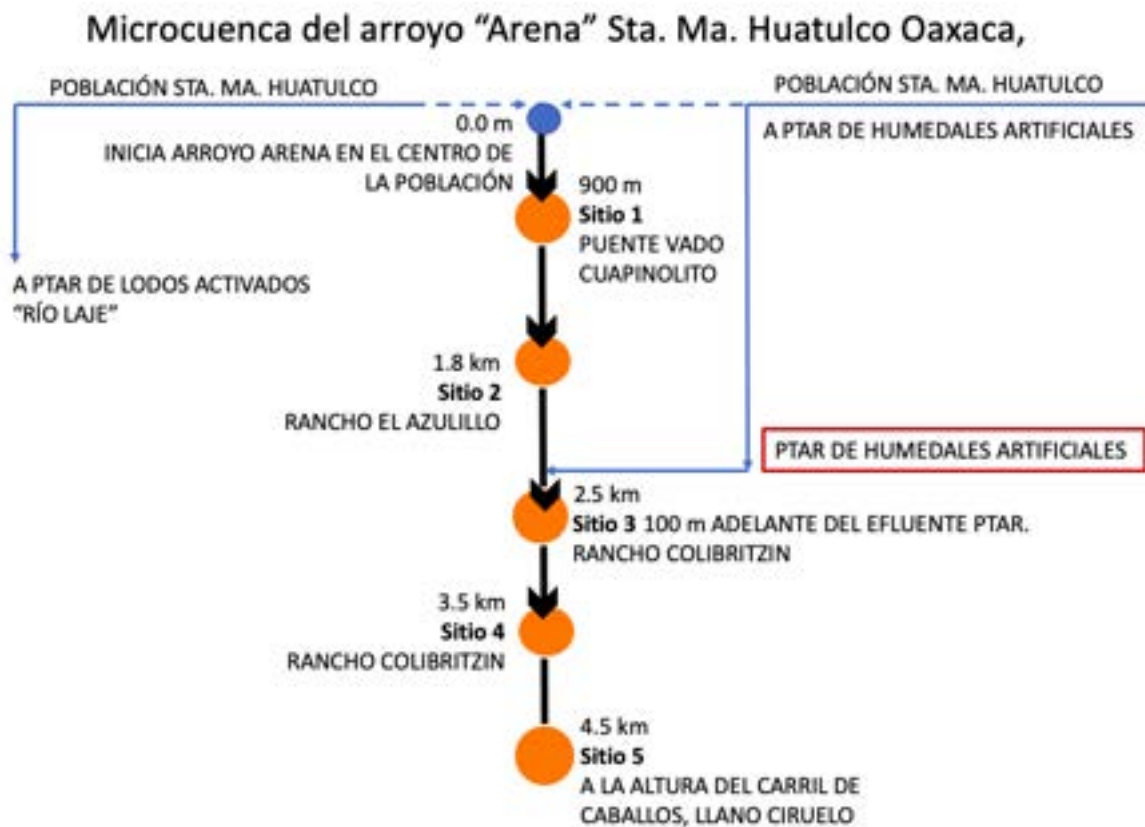
al. (2010), estudiaron a los crustáceos decápodos de las cuencas, Copalita, Zimatán y Coyula en Oaxaca, México, el estudio abarcó 13 localidades de las cuales se capturaron un total de 3,200 crustáceos decápodos y observaron 13 especies de la región y 3 posibles nuevas especies de los géneros *Atya* y *Pseudothelphusa*. En el río Coyula (cuenca media) dominaron 3 especies de átyidos, asimismo una especie perteneciente al género *Atya sp.* y otra al género *Pseudothelphusa*. En la zona baja del río Coyula, en la localidad de Puente de Coyula, se observó mayor contaminación, por la influencia del poblado de Santa María Huatulco, sin embargo, la riqueza de especies fue alta. Como conclusión indicaron que las zonas bajas de los ríos, son de gran importancia para los crustáceos, ya que son áreas de crianza y protección para las larvas, por lo que las desembocaduras de los ríos, desempeñan un papel fundamental en el repoblamiento de las porciones media y alta de los ríos, tanto en crustáceos como en peces con conductas anfidromas, sin embargo, son las zonas más degradadas por las actividades antropogénicas, como desarrollos turísticos, aguas residuales y campos agrícolas. De acuerdo con González-Mora et al., (2009), la cuenca del río Coyula es la más corta y contaminada de las cuencas Copalita-Zimatán-Huatulco, en su trayecto atraviesa el poblado de Santa María Huatulco, del que recoge aguas residuales y aun cuando existen plantas de tratamiento (Rio Laje y en los parajes de El Azulillo) los pobladores de Bajos de Coyula y Puente de Coyula han manifestado afectaciones por aguas negras contaminadas.

## **Metodología**

Determinación de puntos muestreo: Se realizaron visitas de campo a fin de analizar el estado físico de la microcuenca del arroyo Arena, desde el inicio de su formación hasta el punto en donde se une con el río Todos Santos en la comunidad de Puente de Todos Santos, Santa María Huatulco. Se georreferenciaron los puntos visitados a lo largo del arroyo y se determinaron 5 puntos estratégicos para el monitoreo de la calidad del agua: 1; Puente vado Cuapinolito, 2; Rancho El Azulillo, 3; 100m posterior a PTAR El Azulillo, 4; Rancho Colibritzin, 5; Llano Ciruelo (Figura 2). Los muestreos se realizaron las temporadas de lluvias y estiaje.

**Figura 2**

*Sitios de monitoreo de la cuenca del Arroyo Arena, Sta. Ma. Huatulco, Oaxaca*



Los parámetros determinados fueron in situ: caudal, temperatura, pH y oxígeno disuelto (OD), el equipo utilizado fue el multiparamétrico marca HANNA modelo HI98196, ex situ: coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF) y demanda química de oxígeno (DQO). Todas las muestras fueron tomadas en frascos color ámbar y preservadas de acuerdo a su técnica analítica. Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

## Resultados y discusión

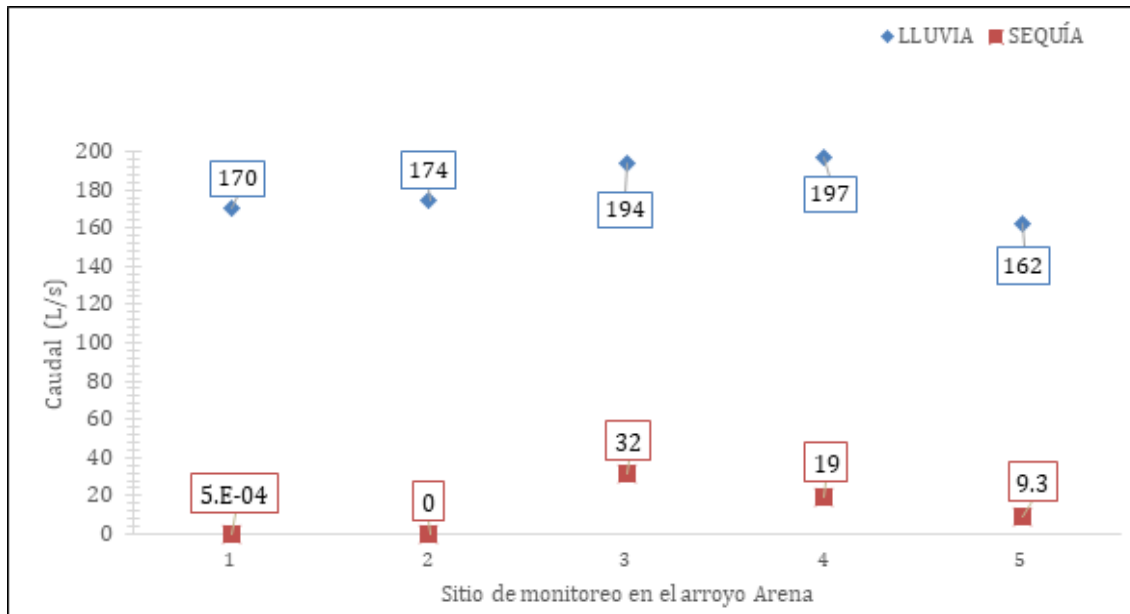
Durante la visita realizada para determinar los puntos de muestreo se analizó la situación real de microcuenca del arroyo Arena, en la cual se observó un escurrimiento de agua de lluvia en la cabecera municipal de Santa María Huatulco y se identificaron las primeras formaciones del arroyo. Posteriormente (900 m más adelante) se encontró el arroyo que

abastece al Arena con agua limpia. Conforme se fue avanzando en el camino se encontraron tuberías de aguas negras rotas las cuales se mezclaron con el arroyo Arena, dichas tuberías de agua tenían como objetivo transportar las aguas negras del poblado de Santa María Huatulco a la PTAR El Azulillo, sin embargo, debido al nulo mantenimiento el caudal de agua residual que logró llegar a la PTAR fue bajo, a tal grado que presentó malos olores en el canal Parshall de la PTAR y por consiguiente una mala operación, posteriormente, el efluente de la planta se unió al arroyo y continuo su cauce observándose con espuma 1.5 km adelante a pesar de que el agua del arroyo presentó un mejor aspecto en términos de olor. Lo anterior se observó en ambas temporadas tanto lluvias como estiaje.

Con respecto al caudal obtenido a lo largo del arroyo Arena, se observaron variaciones en las dos temporadas anuales del estudio. En la temporada de lluvias el caudal oscilo 170-174 L/s en los dos primeros sitios de monitoreo, posteriormente aumentó en un 11%, registrando un valor de 194 L/s, esto se puede atribuir a la cercanía de descarga de la PTAR, la cual descarga directamente al arroyo. Posteriormente en el sitio de monitoreo cuatro, el caudal se reportó de 197 L/s y finalmente en el sitio cinco, se observó una disminución, que puede deberse a la alta cantidad de arena y a la infiltración del agua, con un valor de caudal de 162 L/s. A diferencia de la temporada de sequía, se observó que el arroyo Arena es de tipo intermitente, presentó agua en verano y careció de agua en determinados sitios durante la temporada de sequía; como comportamiento natural del sistema, sin embargo debido a la presencia de un manantial al inicio del cauce, en el sitio de monitoreo uno, se observó un escurrimiento superficial mínimo, el cuál solo se presentó bajo la infraestructura del puente vado de la zona, en donde el agua, después de recorrer los tubos de concreto del puente, se observó que el agua cae en forma de goteras sobre la arena que conforma el cauce del arroyo y se infiltra. El caudal medido, arrojó un resultado de 8.2 L/h ( $5 \times 10^{-4}$  L/s), en el sitio de monitoreo dos, no fue posible observar agua superficial sobre el arroyo impidiendo la toma de muestras y análisis. En el sitio de monitoreo tres, se observó nuevamente agua superficial sobre el arroyo con un caudal de 32.5 L/s resultado obtenido solo por la presencia del efluente de la PTAR El Azulillo. Por su parte el sitio cuatro presentó un caudal de 19.7 y finalmente en el sitio cinco se observó un caudal de 9.3 L/s (Figura 3).

**Figura 3**

*Caudal en los sitios de monitoreo del arroyo Arena*



Con respecto a la temperatura en la zona de estudio obtenida durante las dos temporadas monitoreadas se alcanzaron valores máximos de 31 °C (sequía) y de 25 °C (lluvia), se observó que los valores más bajos registrados se presentaron en los sitios constituidos por abundante vegetación riparia. La temperatura registrada estuvo dentro de lo que establece la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 ya que la máxima aceptable en ríos con uso público urbano y con protección de vida acuática y para aguas de uso recreativo, es de 35 °C. En cuanto a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, se establece un rango de  $\pm 1.5$  °C respecto a la temperatura ambiente, para protección de la vida acuática y  $\pm 2.5$  °C en relación a la temperatura ambiente, para agua con fines de uso para abastecimiento de agua potable. Otro de los parámetros monitoreados fue el pH, el cual se observó en ambas temporadas en un rango de 7.0-7.9 con excepción de un punto en temporada de sequía con un pH de 6.2 en el sitio 4, esto pudo deberse al impacto que tiene la descarga de agua residual en el arroyo, sin embargo, todos los valores obtenidos cumplieron con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece límites de 6 a 9 unidades de pH.

Los resultados de la concentración de OD obtenidos fueron de 2.2 a 6.8 mg/L durante la temporada de estiaje y de 3.1 a 4.8 mg/L en temporada de lluvias. De acuerdo al límite establecido por los Criterios Ecológicos de Protección de Vida Acuática los

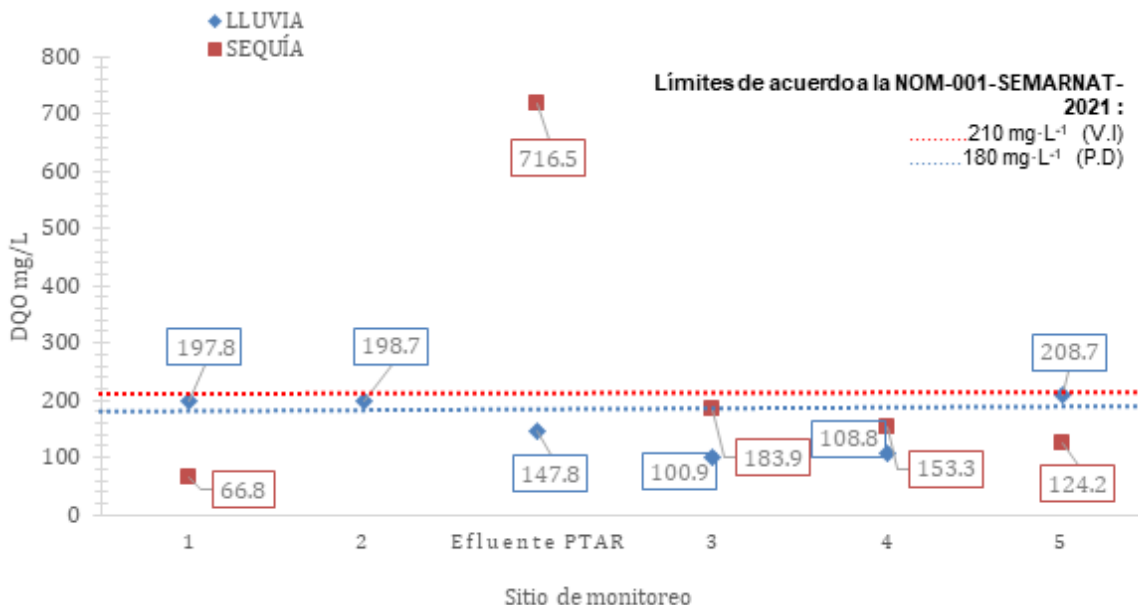
valores registrados por debajo de 5 mg/L no cumplieron, indicando que la zona no presenta características favorables para la vida acuática, lo cual se puede atribuir a la disminución de la vegetación riparia, al poco caudal de la zona y la poca aireación o movimiento del agua en el arroyo. De acuerdo a Metcalf y Eddy (2020), el OD en cuerpos de agua es necesario para la sobrevivencia de las especies acuáticas, concentraciones reducidas de OD, pueden causar estrés y muerte de especies sensibles, los requerimientos de oxígeno disuelto deben estar basados en las especies más sensibles que deben ser protegidas y el valor mínimo es de 5 mg/L, es decir el 50% de OD, para considerar un cuerpo de agua con la cantidad de oxígeno adecuada.

Las concentraciones obtenidas de DQO del arroyo Arena fueron de 66.8 a 716.5 mg/L (sequía) y de 100.9 a 208.73 mg/L (lluvia). De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021 se menciona que para ríos, arroyos, canales y drenes un promedio diario (P.D) de concentración de DQO de 180 mg/L, un promedio mensual (P.M) de 150 mg/L y un valor instantáneo (V.I) de 210 mg/L y de acuerdo a los resultados registrados tres sitios en temporada de lluvia sobrepasaron el límite de la norma mexicana, los sitios uno, dos y cinco con concentración de 197.8 mg/L, 198.7 mg/L y 208.7 mg/L, respectivamente. Mientras que, en temporada de sequías, el sitio tres sobrepasó el límite de norma, con un valor de 183.90 mg/L, así como el efluente de la PTAR El Azulillo (Figura 4). Por su parte, el índice de la Calidad del Agua (ICA) de CONAGUA (2013), establece que las concentraciones de 40 a 200 mg/L, corresponden a la clasificación de aguas contaminadas, representadas por aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal, valor observado en todos los sitios de monitoreo, por su parte el valor reportado en el efluente de la PTAR en la temporada de sequías corresponde a la clasificación de aguas fuertemente contaminadas.



**Figura 4**

*Concentraciones de DQO en monitoreo del arroyo Arena*

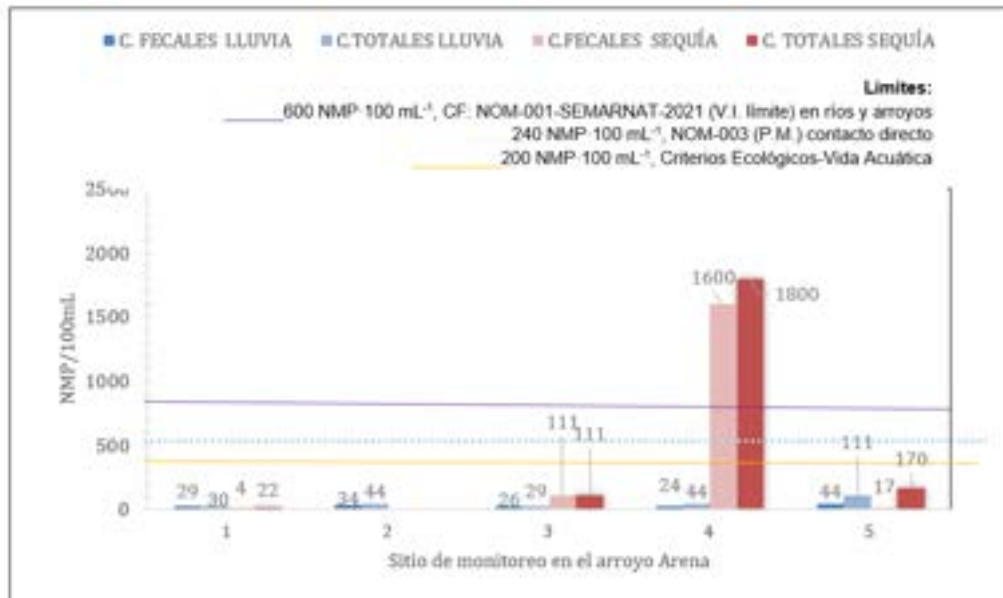


Los valores obtenidos de los CF y CT se presentan en la Figura 5, en la cual se puede observar que los parámetros presentaron concentraciones entre los 22 a 1,800 NMP/100mL durante ambas temporadas. De acuerdo a los ICA de CONAGUA, todos los sitios de monitoreo en la temporada de lluvias se clasificaron en agua de excelente calidad no contaminada o de condiciones normales sin evidencia de alteración en la calidad bacteriológica, sin embargo, en la temporada de sequías los resultados fueron diferentes (excepto para el sitio uno que siguió presentando excelente calidad), el sitio tres se clasificó con buena calidad, pero en el sitio cuatro, la clasificación cambió a contaminada. Dentro de los límites que marca la NOM-001-SEMARNAT-2021 se establece un promedio diario límite de 500 NMP/100 mL de bacterias Coliformes fecales, específicamente *E. Coli*, así como un promedio mensual de 250 NMP/100 mL, y un valor unitario de 600 NMP/100 mL, para CF en ríos y arroyos y la norma mexicana NOM-003-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público con contacto directo establece una concentración máxima de 240 NMP/ 100 mL de CF. Las concentraciones obtenidas en el monitoreo (en su mayoría) se enfocaron dentro de los límites máximos permisibles por ambas normas, con excepción del efluente de la

PTAR y el sitio de monitoreo cuatro que sobrepasan dichos límites (1,600,000 y 1,800 NMP/100 mL respectivamente). Por otro lado, la EPA establece los valores de CT y CF para aguas de uso recreativo y sin restricciones con un valor máximo de 25 NMP/100 mL, además que el 75% de las muestras de CF no deben ser detectables. De acuerdo a lo anterior, el único sitio que cumple con dichas especificaciones es con la norma es el sitio cuatro en temporada de lluvia con una concentración de 24 NMP/100 mL detectado y en a la temporada de sequías, los sitios uno y cinco con concentración de 4 y 17 NMP/ 100 mL de CF respectivamente.

### Figura 5

Concentración de CF y CT en el arroyo Arena



### Conclusiones

El arroyo Arena se ha deteriorado en los últimos años debido a diversos factores, como lo son el aumento de la población y sus descargas de aguas residuales directas al suelo. La falta de presupuesto para dar mantenimiento a las líneas de drenaje y a la PTAR El Azulillo. Las altas concentraciones determinadas en el efluente de la PTAR de hasta 1,600,00 NP/100mL las cuales son descargadas de manera directa al arroyo contaminan el agua, impidiendo un uso recreativo del lugar. Es necesario la implementación de

tecnologías basadas en la naturaleza que permitan la eliminación de contaminantes en el arroyo, ya que al final desemboca en la playa de Huatulco.

## **Bibliografía**

- Brooks, Yolanda M., Spirito, Catherine M., Bae, Justin S., Hong, Anna, Mosier, Emma M., Sausele, Desiree J., Fernandez-Baca, Cristina P., Epstein, Jennifer L., Shapley, Dan J., Goodman, Laura B., Anderson, Renee R., Glaser, Amy L., Richardson, Ruth E. (2020). Fecal indicator bacteria, fecal source tracking markers, and pathogens detected in two Hudson River tributaries. *Water Research*. 171, 115342.
- Burgos, A., Bocco, G., Sosa Ramírez, J. (2015). Dimensiones sociales en el manejo de cuencas (Primera ed.). México, México: *Universidad Nacional Autónoma de México*. Centrp de Investigaciones en Geografía Ambiental, Fundación Río Arronte. 318p. ISBN:978-607-02-6883-0
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del agua en México, Edición 2018. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)*. México.
- CONANP (2003). Programa de Manejo Parque Nacional Huatulco. 53:9 .
- Cotler Ávalos, H. (2010). Las cuencas Hidrográficas de México, Diagnóstico y priorización. México. *Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.* 232p.
- Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989) DOF: CE-CCA-001/89.
- Cué-Bär, Eva M.; Villaseñor, José Luis; Arredondo Amezcua, Libertad; Cornejo Tenorio, Guadalupe; Ibarra Manríquez, Guillermo. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México Boletín de la Sociedad Botánica de México. 78, 47-81. Sociedad Botánica de México Distrito Federal, México
- González, M.A. (1996). Caracterización y priorización de unidades ambientales en la región hidrológica 21, Costa de Oaxaca. Programa de ordenamiento ecológico de la costa de Oaxaca [POECO] y Fondo Mundial para la Naturaleza [WWF], Oaxaca, México.
- González Mora, I. D., de la Lanza Espino, G., y Sánchez Navarro, R. (2009). Memoria del Taller: Propuesta de Caudal Ecológico en la Cuenca Copalita-Zimatán Huatulco,

- Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México. WWF / Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., México. 19
- ICA, Índice de la Calidad del Agua. Compendio de estadísticas ambientales. Edición 2013.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Santa María Huatulco Oaxaca.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Panorama sociodemográfico de Oaxaca. Censo de población y vivienda 2020. *Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG)*. (pp 1181).
- Meave, J.A., Romero-Romero, M.A., Salas-Morales, S.H., Pérez-García, E.A., Gallardo-Cruz, J.A. (2012). Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México. *Ecosistemas* 21(1-2):85-100.
- Metcalf and Eddy (2020). *Wastewater Engineering treatment and resource recovery*. McGraw Hill, EUA.
- NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
- NOM-003-SEMARNAT-1996, Que establece los límites permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- Retama, I., Jonathan, M.P., Priyadarsi., Roy, D., Rodríguez-Espinosa, P.F., Nagarajan, R., Sarkar, S, K., Morales-García, S. S., Muñoz-Sevilla, L.P. (2016). Metal concentrations in sediments from tourist beaches of Huatulco, Oaxaca, Mexico: an evaluation of post-Easter week vacation. *Environ Earth Sci* (2016) 75:375.
- Salas-Morales Silvia H., Schibli, Leo, Nava Zafra, Arturo, y Saynes Vásquez, Alfredo (2007). Flora de la costa de Oaxaca, México: lista florística comentada del parque nacional Huatulco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (81),101-130 ISSN: 0366-2128.
- Talledos Sánchez, E., Enrique Valencia, R., y Filgueiras Nodar, J. (2019). *Turismo, territorio y política en Bahías de Huatulco, Oaxaca*. México, México: Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), División de estudios de

posgrado de investigación, Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), *Pez en el árbol*, Ed. Centro Intradisciplinar para la investigación de la Recreación (CIIO).  
Villalobos-Hiriart, J., Álvarez, F., Hernández, C., de la Lanza-Espino, G., y González-Mora, I. (2010). Crustáceos decápodos de las cuencas Copalita, Zimatán y Coyula, en Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 99-111.

# AGUA PARA USO PÚBLICO URBANO EN LA REGIÓN LAGUNERA, MÉXICO

Carlos Chairez Araiza

## Resumen

En este estudio se documenta y analiza el servicio público urbano proporcionado por los organismos operadores de agua potable (OOAP) y la calidad del agua y disponibilidad media anual del acuífero Principal (0523) región Lagunera, Coahuila. Los resultados obtenidos mediante revisión documental, entrevistas y trabajo de campo, muestran que el servicio de agua para uso público urbano presenta problemas de escases y distribución y, por tanto, se tiene que implementar tandeos, usar pipas de agua, incluso, suspender el servicio en algunas comunidades de ciertos OOAP. En cuanto a la calidad del agua, en un grupo de 63 pozos profundos que alimentan los OOAP en la zona de Gómez Palacio-Torreón, solo cuatro de ellos presentan contenidos de arsénico menor a 0.010 mg/l y, según las fuentes documentales, un 63.62% del volumen que suministran los OOAP en la región Lagunera, mismo que en el futuro se incrementará, contiene cantidades de arsénico mayores a 0.025 mg/l. En relación con el valor de la disponibilidad media anual del agua subterránea, calculada conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015, al utilizar el valor del volumen concesionado como el volumen extraído, no muestra el valor real de la disponibilidad media anual de agua y, por tanto, tampoco el valor real de la sobreexplotación media anual del acuífero Principal (0523).

**Palabras clave:** acuífero Principal, hidroarsenicismo, organismos operadores de agua potable.

## **Introducción**

El acuífero Principal (0523) región Lagunera, Coahuila, es la fuente más importante de agua para uso público urbano en la región Lagunera; es también un acuífero sobreexplotado, con abatimientos medio anuales de 3.2 m, cuyo mayor cono de abatimiento es la zona metropolitana, situación que pone en riesgo el suministro futuro de agua para uso público urbano (Análisis costo beneficio del proyecto agua saludable para la Laguna, s.f., p. 35; CNA, 2020b, p. 32, 35-42); su agua, por ser extraída de estratos cada vez más profundos, es cada vez más antigua y salina y por tanto, de mala calidad según la NOM-127-SSA1-2021 (Molina, 2004, p. 42-48; DOF, 2022; Análisis costo beneficio del proyecto agua saludable para la Laguna, s.f., p. 19; Armienta and Segovia, 2008; p. 345; Canedo, 2021).

En adición, el agua subterránea del acuífero Principal se encuentra monopolizada por un puñado de concesionarios, insensibles a los desabastos de agua para consumo doméstico que se presentan en las principales ciudades de la región Lagunera (Familia Tricio tiene 191 pozos de agua concesionados en La Laguna, 2021; Difunden nueva lista del agua concesionada a la familia Tricio, 2021); mientras, los gobiernos municipales calman las voces de la ciudadanía perforando nuevos pozos en el acuífero Principal para el servicio público urbano (Campos, 2022; Alcalá, 2022b; Muñoz, 2022b), sin dar cabal cumplimiento a la disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible, dispuesta por Decreto presidencial (DOF, 2012).

El presente trabajo tiene por objetivo documentar y analizar (a) el servicio público urbano proporcionado por los organismos operadores de agua potable (OOAP) y (b) la calidad del agua y disponibilidad media anual del acuífero Principal (0523) región Lagunera, Coahuila.

## **Marco teórico**

La centralización o federalización del manejo de las aguas superficiales y subterráneas, según Herrera y Lasso (1919) y Aboites (1998) citados por Galindo y Palerm (2007), cubre un período que va de 1888-1946, cuando en México el gobierno central, a través

del ejecutivo federal, se convierte en la autoridad máxima en materia de aguas. En tanto, el período 1988-1994 se caracteriza por la puesta en marcha de una estrategia de descentralización “desde el centro” hacia los gobiernos locales. Un proceso de descentralización que en el discurso busca desconcentrar recursos y descentralizar decisiones con los propósitos de la eficiencia en la gestión estatal, fortalecimiento de los niveles locales de gobierno y profundización de la democracia, pero que, en el fondo, también busca descentralizar conflictos y responsabilidades (Martínez, 1998, p. 29-30).

Es el caso de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado, cuya responsabilidad se estableció a los municipios en los artículos 4 (Derecho humano al agua), 27 (la Propiedad y Administración Nacional del Agua y 115 (la Atribución de los Servicios Públicos a los gobiernos municipales) de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos (Flores, 2021).

### *El Servicio de Agua para Uso Público Urbano en la región Lagunera*

Para proporcionar el servicio de agua para uso público urbano, la región Lagunera cuenta con once organismos operadores de agua potable (OOAP), cinco en la región Lagunera-Durango y seis en la región Lagunera-Coahuila.

En la región Lagunera-Durango se localizan en los municipios de Lerdo (SAPAL Lerdo), Gómez Palacio (SIDEAPA para la zona urbana y SIDEAPAAR para la zona rural), Mapimí (SIDEAM) y Tlahualilo (SAPAT); en tanto, en la región Lagunera-Coahuila, se ubican en los municipios de Torreón (SIMAS Torreón y SIMAS Torreón-Jardín), Matamoros (SIMAS Matamoros), Francisco I. Madero (SIMAS Fco. I. Madero) y San Pedro de las Colonias (SIMAS San Pedro) (CNA, 2020a).

Los OOAP son administrados por los municipios, a excepción del de SIMAS Torreón Jardín que es administrado por la Sociedad Cooperativa de Consumo de Servicios de la Colonia Torreón Jardín S.C. de R.L. de C.V. (coments. OOAP, 2022; Trabajo de campo 2022).

- a) Población con servicio público doméstico. La población atendida con servicio de agua para uso público doméstico es de 584,138 habitantes en el estado de Durango y 1,019,566 habitantes en el estado de Coahuila, lo que hace un total de 1,603,704



habitantes (INEGI, 2020); en tanto, Conagua reporta 1,631,547 habitantes (CNA, 2020a).

- b) Fuentes de agua. Las únicas fuentes de agua para uso público urbano de los OOAP, las constituyen 186 pozos profundos activos y 11 pozos inactivos, la mayoría localizados en el área del acuífero Principal (0523), región Lagunera; un número de 8 pozos, del total de 186 pozos profundos, se encuentran localizados en el acuífero de Villa Juárez (zona de San Fernando) y forman parte del inventario del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado (SAPAL) de Lerdo, Dgo. (CNA, 2020a; coments. OOAP, 2022).

El SAPAL Lerdo cuenta con 11 pozos activos, SIDEAPA Gómez Palacio con 32 pozos activos, SIDEAPAAR Gómez Palacio con 12 pozos activos para la zona rural, SIDEAM Mapimí con 6 pozos activos, SAPAT Tlahualilo con 3 pozos activos y 1 inactivo, SIMAS Torreón 76 pozos activos y 6 inactivos, SIMAS Torr-Mat-Viesca con 24 pozos activos y 2 inactivos, SIMAS Torreón Jardín con 3 pozos activos, SIMAS Matamoros con 7 pozos activos, SIMAS Francisco I. Madero con 6 pozos activos y 1 inactivo y, SIMAS San Pedro de Las Colonias con 6 pozos activos y 1 inactivo (CNA, 2020a; Trabajo de campo, 2022).

- c) Volumen extraído. La extracción de agua de pozos para uso público urbano es del orden de los 198,994,571 metros cúbicos anuales (6,310.08 l/s), mayor a los 163.75 millones m<sup>3</sup> concesionados (CNA, 2020a; CNA, 2022).

El SAPAL Lerdo extrae 14,198,457 m<sup>3</sup>/año, SIDEAPA Gómez Palacio 56,660,151 m<sup>3</sup>/año, SIDEAPAAR Gómez Palacio 8,468,678 m<sup>3</sup>/año, SIDEAM Mapimí 3,405,888 m<sup>3</sup>/año, SAPAT Tlahualilo 2,984,256 m<sup>3</sup>/año, SIMAS Torreón 79,094,352 m<sup>3</sup>/año, SIMAS Torr-Mat-Viesca 10,972,621 m<sup>3</sup>/año, SIMAS Torreón Jardín 764,489, SIMAS Matamoros 7,552,617 m<sup>3</sup>/año, SIMAS Francisco I. Madero 6,094,518 m<sup>3</sup>/año y SIMAS San Pedro de Las Colonias 8,798,544 m<sup>3</sup>/año (CNA, 2020a).

- d) Eficiencia de conducción. La eficiencia de conducción varía en cada OOAP y en caso de que se mejore, a nivel regional, se podrían recuperar hasta 82,224,219 m<sup>3</sup>/año (2,607.31 l/s).

El SAPAL Lerdo presenta una eficiencia total del 59%, SIDEAPA Gómez Palacio 66%, SIDEAPAAR Gómez Palacio 51%, SIDEAM Mapimí 59%, SAPAT

Tlahualilo 54%, SIMAS Torreón 49%, SIMAS Torreón Jardín 93%, SIMAS Torr-Mat-Viesca 90%, SIMAS Matamoros 64%, SIMAS Francisco I. Madero 61% y SIMAS San Pedro de las Colonias 61% (CNA, 2020a).

- e) Consumo de agua por sector. En cuanto a consumo, el uso doméstico ocupa el 82.76%, el comercial 6.03%, el industrial 4.81% y otros, 6.40% del volumen total, respectivamente (CNA, 2020a).
- f) Cantidad disponible por persona. La cantidad de agua total para uso doméstico, entregada por los OOAP, es de 96,637,872 m<sup>3</sup>/año o 3,064.37 l/s, por lo que cada persona, para satisfacer sus necesidades vitales de consumo e higiene, recibe una cantidad superior a los 100 litros diarios de agua clorada, que es diferente al agua potable (CNA, 2020a).

El SAPAL Lerdo, por persona/día, presenta un consumo de 146 litros, SIDEAPA Gómez Palacio 259 litros, SIDEAPAAR Gómez Palacio 177 litros, SIDEAM Mapimí 205 litros, SAPAT Tlahualilo 125 litros, SIMAS Torreón 127 litros, SIMAS Torreón Jardín 191 litros, SIMAS Torr-Mat-Viesca 179 litros, SIMAS Matamoros 128 litros, SIMAS Francisco I. Madero 128 litros y SIMAS San Pedro 129 litros (CNA, 2020a).

- g) Servicio discontinuo. Los OOAP indican que, de un total de 505,804 tomas de agua potable, 52,587 son de uso discontinuo, éstas últimas ubicadas en los municipios de Tlahualilo (7,652), Mapimí (4,261), Torreón -SIMAS TMV (11,332), Matamoros (907), Francisco I. Madero (8,099) y San Pedro (20,336) (CNA, 2020a). En otro estudio se indica que, solo el 59.3% de la población cuenta con servicio continuo, el 79% cuenta mala presión en la toma domiciliaria, el 11.1% recurre al uso de pipas cuyo costo oscila entre \$700-3,000/pipa de 10 mil litros y el 83.2% adquiere 173 garrafones por año, cuyo costo oscila entre \$17-28 (Análisis costo beneficio del proyecto agua saludable para la Laguna, s.f., p. 29-30).

En esta primavera/verano de 2022, se cuenta con reportes que indican el desbaste de agua potable, por varios días, en varios puntos de la región Lagunera y de nueva cuenta, se pusieron sobre la mesa los temas de tandeo, uso de pipas de agua y la suspensión del servicio (Iturriaga, 2022a; Iturriaga, 2022b; Vázquez, 2022; Alcalá, 2022a; Rábago, 2022; Muñoz, 2022a; López, 2022; González, 2022; Sandoval, 2022).

En relación al uso de pipas para el abasto de agua para consumo doméstico se encontró que, (1) en SAPAL Lerdo, por la falta de red hidráulica, en temporada de calor se entrega de 15 a 16 pipas/día con capacidad de 10-15 mil litros, a las comunidades de La Rinconada, La Mina y La Carpa, municipio de Lerdo, Dgo.; (2) en SAPAT Tlahualilo, en adición, al tandeo que se implementa en temporada de calor, se establece el servicio de agua potable en pipas por semana, con capacidad de 20 mil litros, para las comunidades de Pompeya (3 pipas), Oquendo (seis pipas), La Sierrita (dos pipas), Nombre de Dios (una pipa), Granja Morelos (una pipa), Nuevo México Marmoleros (una pipa), Vallas (una pipa) y Cartagena (una pipa); (3) en SIDEAM Mapimí se atiende a la colonia Irrigación con una pipa/semana, con capacidad de 10 mil litros; (4) en SIMAS Torr-Mat-Viesca se proporciona el servicio de agua a las comunidades de La Unión y Mieleras, con una cantidad de 4-5 pipas/día, con capacidad de 10 mil litros de agua; y, (5) en SIMAS San Pedro se proporciona el servicio de agua a las comunidades San Nicolás, Santa Rita, Sofía, San Patricio, San Felipe, Frontera, San Miguel, Alejandría, Santiago, Tacubaya, Carolina, Porvenir, Patrocinio, San Salvador, Altamira, Progreso; a los fraccionamientos Los Nogales, San Fernando, Berrueto, Altamira; y a las colonias Barrio San Luis, Ejidal Valparaíso, Jorge Abdala y Predio San José; a cada una, con 5 pipas/día, con capacidad de 10 mil litros, en temporada de calor y, en temporada de frío con 1-2 pipas/día con capacidad de 10 mil litros (coments. OOAP, 2022).

En cuanto a la práctica de los tandeos para el abasto de agua potable se encontró que, (1) en SAPAL Lerdo, pese a que este organismo reporta cero servicios discontinuos y a que cuentan con una planta de rebombeo, las colonias ubicadas en la parte norte y norponiente de la ciudad de Lerdo, Dgo., no reciben el servicio de manera continua porque no existe la potencia necesaria para hacerles llegar el agua. En la zona norte de la ciudad de Lerdo, estas colonias son: El Edén, Jerusalén, Nueva Rosita, Quinta Lerdo, Los Laureles, La Reyna, Magisterial, Los Sauces, La Primavera y Quinta Lerdo; en tanto, en la zona nororiental, se encuentran las colonias: Los Reyes, Castilagua, San Antonio, Lucio Cabañas, Simón Zamora y José Revueltas; (2) en SAPAT Tlahualilo, en temporada de calor, debido al incremento en la demanda, tanto en la cabecera municipal como en las comunidades que se atienden, el servicio de agua potable se realiza por tandas (1 día sí, 1 día no); (3) en SIDEAM Mapimí, la colonia Irrigación recibe el agua por tandeo (1 día sí, 1 día no); (4) en SIMAS TMV, las comunidades de la Unión (Torreón), Flor de Mayo

(Matamoros), San Felipe (Matamoros), Filipinas (Matamoros), Irlanda (Matamoros), San Pablo (Matamoros) Mieleras (Viesca), reciben el agua mediante tandeo, un día sí, otro día no; (5) en SIMAS Matamoros, las comunidades de Bilbao, Benavídez, La Luz, Rancho Grande y La Libertad, no reciben el servicio de manera continua. Incluso, en temporada de calor, Bilbao y Benavídez no reciben el agua; y, (6) en SIMAS Francisco I. Madero, el tandeo en las comunidades o colonias se efectúa conforme a la fuente de agua: (A) Pozo San Esteban. Las comunidades de El Retoño, San Esteban, Florida, Francisco Villa y Porvenir, reciben agua todos los días, sin indicar horario, (B) Pozo Virginias. La comunidad La Coruña, los lunes, miércoles y viernes, recibe agua de las 7:00 am a las 10:00 am; Saloña y Yucatán, los mismos días con horario de 10:00 a 12:00 pm; Colón y San Juan de Ulúa, los mismos días, con horario de 12:00 pm a 14:00 pm; La Pinta, los mismos días con horario de 14:00 pm a las 17:00 pm; Las Mercedes, los martes y jueves, recibe agua, sin indicar horario; Hidalgo, Buenavista, Virginias, Florencia, Lequeitio y Las Vegas, los mismos días, sin indicar horario. Los lunes, miércoles y viernes, posterior de las 18:00 pm, las comunidades indicadas, tienen acceso libre; (C) Pozo Alamito. Las comunidades y 46 colonias de la ciudad de Francisco I. Madero que reciben el agua, se les cierra el acceso los martes, jueves, sábado y domingo, en horario de 7:00 am a las 13:00 pm; a Jaboncillo, Alamito, Nuevo León, 20 de noviembre, El Cuije y Compuertas, en estos mismos días no se les cierra el acceso. Los lunes, miércoles, viernes y domingo, las comunidades tienen acceso al agua todo el día; y (D) Pozo Almacén. Un total de 46 colonias de la ciudad de Francisco I. Madero reciben el agua todos los días, en horario de 7:00 am a 12:00 pm y de las 18:00 pm a las 23:00 pm (coments. OOAP, 2022).

El SIDEAPA y SIDEAPAAR de Gómez Palacio, Dgo., indicaron que no hacen uso de pipas de agua ni tandeos, cosa que no coincide con lo publicado en notas periodísticas; y el SIMAS de Torreón, Coah., pese a las reiteradas solicitudes por escrito y vía telefónica, nunca accedieron a proporcionar la información solicitada (coments. OAP, 2022; Trabajo de campo, 2022).

### *Calidad del Agua y Disponibilidad Media Anual del Acuífero Principal (0523)*

El fluoruro y el arsénico son reconocidos como los principales contaminantes inorgánicos más graves en el agua potable a nivel mundial (Smedley and Kinniburgh,

2002, p. 520). En la región Lagunera, el origen de la contaminación del acuífero granular por arsénico, es todavía controversial (Armienta and Segovia, 2008; p. 346).

Rosas et al (1997), en un estudio que consideró 73 muestras de agua de pozo y 50 muestras de suelo, forraje y leche, encontraron que el agua de pozo contenía de 7 a 740  $\mu\text{gL}^{-1}$  y, alrededor del noventa por ciento del arsénico total fue encontrado como As (V); en el suelo, el arsénico total presento un valor de 30  $\mu\text{g g}^{-1}$  y una cantidad de arsénico extraíble no mayor al 12% del total, siendo mayor a 30 cm de profundidad; en la alfalfa, el cultivo más importante de la región, el arsénico total osciló entre 0.24 y 3.16  $\mu\text{g g}^{-1}$ ; y en la leche,  $< 0.9$  a 27.4  $\text{ng g}^{-1}$ .

Molina (2004), en un estudio que consideró 58 pozos agrícolas, de abrevadero o industriales, encontró que el agua proveniente de estos pozos, presenta altos contenidos de arsénico que rebasan los límites permisibles, así como cantidades importantes de Flúor (p. 21, 42-46).

En un estudio más reciente, Azpilcueta et al (2017), en la valoración de la calidad química del agua de riego de pozo profundo en campos productores de maíz forrajero en la comarca Lagunera, Méx., realizado en ocho pozos para riego de los estados de Coahuila (San Pedro y Matamoros) y Durango (Gómez Palacio, Lerdo, Bermejillo y Tlahualilo); encontraron concentraciones de 0.302 mg/L para Pb, 0.039 mg/L para el Cd y 0.036 mg/L para el As (p. 75-83).

Por su parte, Sariñana et al (2017, como se cita en Armienta et al, 2021), encontraron que en 59 sitios donde se tomaron muestras de suelo y agua, comprendiendo los municipios de Gómez Palacio, Torreón, Matamoros, Tlahualilo, Lerdo, San Pedro y Viesca; el 94.1% de las muestras sobrepasaron la concentración de 0.01 mg/L para As, alcanzando valores de hasta 0.33 mg/L, aunque en dos sitios (3.4% de las muestras correspondientes al municipio de Matamoros), las concentraciones fueron de 0.49 y 0.65 mg/L; además, las concentraciones de fluoruro fueron del orden de 0.25-1.8 mg/L, correspondiendo a las reportadas en otros estudios, siendo las concentraciones más altas, las que se determinaron en los sitios de los municipios de Matamoros y San Pedro (p. 24).

En tanto, Aparicio (2018), en muestras de agua tomadas de un pozo y datos históricos de pozos de la región, encontró que las concentraciones de arsénico a las profundidades de 180 m, 200, 220 m, 240 m, 280 y 300 m fueron del orden de los 17, 31, 25, 211, 113 y 168  $\mu\text{g/l}$ , respectivamente; mostrando que en Fco. I. Madero-San Pedro-Matamoros-Viesca-

Tlahualilo y Mapimí, en dirección a las montañas, presenta las máximas concentraciones de arsénico; en cuanto al flúor, para las profundidades indicadas, reporta 0.47, 0.57, 0.54, 1.01, 1.49 y 1.57 mg/l, respectivamente, señalando las zonas de Matamoros, San Pedro y Viesca, como las áreas con concentraciones que oscilan entre 1.6-3.7 mg/l, presentando las máximas concentraciones en Mapimí y una parte de Matamoros y Viesca (p. 43, 51, 56-58, 71-73).

Poblete-Naredo et al (2021, p. 109), reportan diferentes concentraciones de arsénico en el agua para consumo, encontradas en algunas comunidades de la región Lagunera: en el municipio de Francisco I. Madero, en las comunidades de Batopilas 0.285-0.369 mg/l, Covadonga 0.217 mg/l, El Cántabro 0.271-0.750, El Dorado 0.544-0.695 mg/l, Finisterre (0.290-0.949 mg/l, Olzanduri 0.270 mg/l y San Salvador de arriba 0.488 mg/l; en el municipio de Tlahualilo, en la comunidad de Ceceda 0.197 mg/l; y, en el municipio de San Pedro, en las comunidades de Albia 0.277 mg/l, Nuevo Mundo 0.150-0.518 mg/l, San Rafael de Arriba 0.165 mg/l, Santa Ana de Arriba 0.390 mg/l y Sofía de Arriba 0.513 mg/l (p. 109).

En este año 2022, se encontró que de un total de 53 pozos profundos que se encuentran ubicados en la zona de Gómez Palacio-Torreón-Viesca y que surten de agua a los OOAP ubicados en esta área, solo cuatro de ellos tienen concentraciones de arsénico menores a 0.010 mg/l, once de ellos entre 0.010-0.025 mg/l y treinta y ocho de ellos con concentraciones mayores a 0.025 de arsénico mg/l; y, de estos últimos, once con concentraciones de arsénico que oscilan entre 0.025-0.030 mg/l, cinco entre 0.031-0.040 mg/l, seis entre 0.041-0.050 mg/l, tres entre 0.051-0.060 mg/l, cuatro entre 0.061-0.070 mg/l, uno entre 0.071-0.080 mg/l, uno entre 0.081-0.090 mg/l y siete mayor a 0.091 mg/l (coments. OOAP, 2022).

En otro estudio se reporta que el 63.62% (126,600,340.70 m<sup>3</sup>/año) del volumen total de agua producido para uso público urbano (198,994,571 m<sup>3</sup>/año), contiene cantidades mayores a 0.025 mg/l de arsénico; se indica que la región Lagunera se encuentra en el lugar 12 de casos en el mundo, por la acentuación del Hidroarsenicismo Agudo Crónico Regional Endémico (HACRE), que provoca alteraciones cardiacas, vasculares y neurológicas; repercusiones en el aparato respiratorio; y, lesiones hepáticas, renales e hiperqueratosis cutánea que avanzan progresivamente hasta las neoplasias o cáncer. También se indica que debido a la sobreexplotación del acuífero y a que se continúa perforando nuevos

pozos para cubrir la demanda, en el futuro se proyecta un deterioro de la calidad del agua, estimándose que en el año 2055 solo el 24.32% del agua producida contendrá arsénico dentro del límite permisible (Análisis costo beneficio del proyecto agua saludable para la Laguna, s.f., p. 5, 47-48; Los sobrevivientes del arsénico, 2011, p. 3-13).

En lo referente a la Disponibilidad Media Anual de Agua en el acuífero Principal (0523), la Ley de Aguas Nacionales de 1992 (LAN), en su artículo 3, inciso XXIV, indica que, en una unidad hidrogeológica, la disponibilidad media anual es el volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de esa unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (CDHCU, 2022, p. 4).

En la NOM-011-CONAGUA-2015, siguiendo lo indicado por la Ley de Aguas Nacionales de 1992, en los incisos 4.3 y 4.3.1 se indica la expresión mediante la cual será calculada disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero (DMA),  $DMA = RTA - DNC - EAS$ , donde RTA es la recarga media anual, DNC es la descarga natural comprometida y EAS las extracción de aguas subterráneas; en adición en el inciso 4.3.4, en lo referente a la extracción de aguas subterráneas (EAS), se indica que estas se determinan sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, determinados para el acuífero de que se trate, todos ellos referidos a una fecha de corte específica (DOF, 2015).

El estudio de la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Principal (0523) (2000-2015), con una área de balance de 3760 km<sup>2</sup>, que es la que tenía mayor información piezométrica y mejor cobertura espacial; una recarga media anual de 534.1 hm<sup>3</sup>/año; un valor de descarga comprometida de 0.00 hm<sup>3</sup>/año; un volumen de extracción de aguas subterráneas (volumen concesionado) de 683.145850 hm<sup>3</sup>/año, este último con corte al 20 de febrero del 2020; un volumen de extracciones estimadas por bombeo de 1,088.50 millones de m<sup>3</sup>; la disponibilidad media anual resultó ser de -149.04585 hm<sup>3</sup>/año ( $DMA = RTA - DNC - EAS$ ;  $DMA = 534.1 - 0.00 - 683.14585$ ;  $DMA = -149.04585$ ); y por tanto, según Conagua, no se dispone de volumen para nuevas concesiones (CNA, 2020b, p. 35-42).

## **Metodología**

La presentación está basada en fuentes documentales primarias y secundarias, resultados preliminares de trabajo de campo y aplicación de entrevistas presenciales, previamente elaboradas, a funcionarios de los once organismos operadores de agua potable de la zona metropolitana de la región Lagunera. La información obtenida se organizó para su análisis y sistematización.

## **Resultados y discusión**

El servicio de agua para uso público urbano, por la infraestructura existente en los OOAP y la sobreexplotación del acuífero Principal (0523), es discontinuo en un gran porcentaje de las tomas domiciliarias y, por tanto, se tienen que implementar tandeos, hacer uso de pipas de agua y suspender el servicio en algunas comunidades, esto último, en ciertos OOAP.

En un número de 63 pozos profundos ubicados en el área conurbada de Gómez Palacio-Torreón, se encontró que solo 4 de ellos tienen concentraciones de arsénicos menor a 0.010 mg/l; en tanto, una de las fuentes documentadas indica que el 63.62% del volumen que suministran los OOAP, mismo que en el futuro se incrementará por la sobreexplotación a la que está sometido el acuífero Principal, contiene cantidades mayores a 0.025 mg/l.

En relación con el valor de la disponibilidad media anual del agua subterránea del acuífero Principal (0523), calculado conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015, al utilizar el valor del volumen concesionado como el volumen extraído, en lugar del valor de la extracción estimada o real; no muestra el valor real de la disponibilidad media anual de agua y, por tanto, tampoco el valor real de sobreexplotación media anual del acuífero Principal (0523), como lo indica Canedo (2021).

## **Conclusiones**

El servicio de agua para uso público urbano presenta problemas de escases y distribución y, por tanto, se tiene que implementar tandeos, usar pipas de agua, incluso, suspender el servicio en algunas comunidades de ciertos OOAP. En cuanto a la calidad del agua, en



un grupo de 63 pozos profundos que alimentan los OOAP en la zona de Gómez Palacio-Torreón, solo cuatro de ellos presentan contenidos de arsénico menor a 0.010 mg/l y, según las fuentes documentales, un 63.62% del volumen que suministran los OOAP en la región Lagunera, mismo que en el futuro se incrementará, contiene cantidades de arsénico mayores a 0.025 mg/l. En relación a la disponibilidad media anual del agua subterránea, calculada conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015, al utilizar el valor del volumen concesionado como el volumen extraído, no muestra el valor real de la disponibilidad media anual de agua y, por tanto, tampoco el valor real de la sobreexplotación media anual del acuífero Principal (0523).

## **Bibliografía**

- Alcalá B. (01 de junio de 2022a). Torreón y Matamoros suman 42 quejas ante CDHC por falta de agua. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/torreon-matamoros-suman-42-quejas-cdhc-falta-agua>
- Alcalá B. (03 de agosto de 2022b). En agosto inaugurarán tres pozos de agua nuevos en Torreón. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/torreon-en-agosto-inauguraran-tres-pozos-de-agua-nuevos>
- Análisis costo beneficio del proyecto agua saludable para la Laguna. (s.f.). En formato electrónico.
- Aparicio González, J. C. (2018). *Estudio geohidrológico del acuífero principal de la comarca Lagunera, estados Durango y Coahuila*. [Tesis de maestría, IPN-ESIA Ticomán, México]. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/25762/Estudio%20geohidro%C3%B3gico%20del%20acu%C3%ADfero%20principal%20de%20la%20comarca%20lagunera%2C%20Estados%20Durango%20y%20Coahuila.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Armienta M. A., Cardona A., Labastida I., Alfaro de la T. Ma. C. y Ballinas C. M. de L. (2021). *Situación de la presencia de arsénico y fluoruro en aguas subterráneas de México*. En L. Ma. Del Razo, J.M. Ledón y M.N. Velasco (Compiladores y coordinadores), En *Hacia el cumplimiento del derecho humano al agua. Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia*

- en México*. Instituto de Geofísica-UNAM (pp. 23-31). México: Instituto de Geofísica-Universidad Nacional Autónoma de México. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.geofisica.unam.mx/assets/afa\_-arsenico-y-fluoruro-en-agua\_libro-completo.pdf
- Armienta, M. A. y Segovia N. (2008). *Arsenic and Xuoride in the groundwater of Mexico*. Revista Environ Geochem Health (2008) 30:345-353, 346-347. DOI: 10.1007/s10653-008-9167-8.
- Azpilcueta, P. M. E., Pedroza S. A., Sánchez C., I., Salcedo J. M. del R. y Trejo C. R. (2017). *Calidad química del agua en un área agrícola de maíz forrajero (Zea Mays L.) en la comarca Lagunera, México*. Rev. Int. Cont. Ambie. 33 (1) 75-83, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.07>
- Canedo, F. P. (12 de septiembre de 2021). Extracción del acuífero Principal es mayor a la presentada por Conagua: Especialista. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2021/extraccion-de-acuifero-es-mayor-a-presentada-por-conagua-especialista.html>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (CDHCU). (2022). Ley de Aguas Nacionales. Nueva Ley publicada en el Diario de la Federación el 1° de diciembre de 1992. Última reforma publicada DOF 11-05-2022. Recuperada en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf
- Campos P., M.A. (8 de abril de 2022). Inicia la perforación de nuevos pozos de agua en Torreón. *El Siglo de La Laguna*. <https://www.elsoldelalaguna.com.mx/local/torreon/inicia-la-perforacion-de-nuevos-pozos-de-agua-en-torreon-8111652.html>
- CNA. (2020a). *Información básica de prestadores de servicios de agua potable y saneamiento (Localidades mayores de 10,000 habitantes)*. En formato electrónico.
- CNA. (2020b). *Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero principal -Región Lagunera (0523), estado de Coahuila*. Recuperado en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\_Acuiferos\_18/coahuila/DR\_0523.pdf
- CNA. (2022). Consulta a la base de datos del REPDA. Recuperado en: <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>

- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). *Decreto por el que se Declara reformado el párrafo quinto y se adiciona un párrafo sexto recorriéndose en su orden los subsecuentes, al artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. 8 de febrero de 2012. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5232952&fecha=08/02/2012](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5232952&fecha=08/02/2012)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). NORMA Oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. 27 de marzo de 2015. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2022). *NORMA oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. 2 de mayo de 2022. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022)
- Difunden nueva lista del agua concesionada a la familia Tricio. (25 de agosto de 2021). *El Demócrata. Primer diario digital de Coahuila*. <https://democratacoahuila.com/2021/08/25/difunden-nueva-lista-del-agua-concesionada-a-la-familia-tricio/>
- Familia Tricio tiene 191 pozos de agua concesionados en La Laguna. (19 agosto de 2021). *Redespoder*. <https://www.redespoder.com/destacadas/familia-tricio-agua/>
- Flores F. J.F. (2021). *Diagnóstico sobre el papel de los organismos operadores como generadores y usuarios de información sobre agua*. [https://ciesas.edu.mx/wp-content/uploads/2021/11/DiagnosticoConstruccion%CC%81nSistema-Integral\\_Flores-Felix-J-Francisco-.pdf](https://ciesas.edu.mx/wp-content/uploads/2021/11/DiagnosticoConstruccion%CC%81nSistema-Integral_Flores-Felix-J-Francisco-.pdf)
- Galindo E. E. y Palerm V. Jacinta. (2007). *Pequeños sistemas de agua potable: Entre la autogestión y el manejo municipal en el estado de Hidalgo, México*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v4n2/v4n2a3.pdf>
- González, D. (2 de junio de 2022). Cabildo reconoce problema de falta de agua en Gómez Palacio. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/cabildo-reconoce-problema-de-falta-de-agua-en-gomez-palacio.html>
- INEGI. (2020). Censo De población 2020. Recuperado en: <https://censo2020.mx/>

- Iturriaga, R. (18 de mayo de 2022a). Bloquean boulevard de Torreón en protesta contra SIMAS. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/bloquean-bulevar-de-torreon-en-protesta-contrasimas.html>
- Iturriaga, R. (30 de junio de 2022b). Gastamos en pipas 440 mil pesos semanales. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/gastamos-en-pipas-400-mil-pesos-semanales.html>
- López, L.A. (4 de mayo de 2022). Al menos 30 escuelas de Torreón reciben agua vía pipas. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/torreon-30-escuelas-reciben-agua-via-pipas>
- Los sobrevivientes del arsénico (2011). La Laguna: *Vanguardia. Semanario. Periodismo de investigación*, (No. 284). [chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.periodismo.org.mx/assets/reportaje\\_pnp2011.pdf](chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.periodismo.org.mx/assets/reportaje_pnp2011.pdf)
- Martínez, Pedro. (1998). El fortalecimiento del municipio como institución receptora de la descentralización. En: *Gestión y Estrategia* No. 14, Julio-diciembre. UAM–A. México. <https://gestionyestrategia.azc.uam.mx/index.php/rge/article/view/340>
- Molina Maldonado, A. (2004). *Estudio hidrogeoquímico en la Comarca Lagunera, México*. [Tesis de maestría, UNAM, México]. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-hidrogeoquimico-en-la-comarca-lagunera-mexico-92274?c=plQ22N&d=false&q=\\*&i=2&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-hidrogeoquimico-en-la-comarca-lagunera-mexico-92274?c=plQ22N&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0)
- Muñoz, E. (9 de junio de 2022a). Comerciantes de Madero deben madrugar por agua. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/comerciantes-de-madero-deben-madrugar-por-agua.html>
- Muñoz, E. (4 de julio de 2022b). Los analistas. Hablando de negocios. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/hablando-de-negocios.2103871.html>
- Poblete, N. I., García S. J. J., Salinas A. J. E., Corona, N. R. O. y Albores, R. (2021). Caso La Laguna. En L. Ma. Del Razo, J.M. Ledón y M.N. Velasco (Compiladores y coordinadores), En *Hacia el cumplimiento del derecho humano al agua. Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México*. Instituto de Geofísica-UNAM (pp. 107-115). México: Instituto de Geofísica-Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado en: [chrome-](chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/)

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.geofisica.unam.mx/assets/afa\_-arsenico-y-fluoruro-en-agua\_libro-completo.pdf
- Rábago, I. (10 de junio de 2022). En Gómez Palacio, el 40% de las colonias no tienen agua. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/en-gomez-palacio-40-por-ciento-de-las-colonias-no-tienen-agua>
- Rosas, I., Belmont, R., Armienta, A. and Báez, A. (1999). *Arsenic concentrations in water, soli, milk and forage in Comarca Lagunera, México*. *Revista Water, air and soil pollution* 112(1): 133-149. DOI: 10.1023/A:1005095900193.
- Sandoval, A. (20 de mayo de 2022). Emiten recomendación al SIMAS de Matamoros por dejar a ejido sin agua potable durante diez meses. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/emiten-recomendacion-al-simas-de-matamoros-por-dejar-a-ejido-sin-agua-potable-durante-diez-meses.html>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. *Applied Geochemistry*, 17, 517–568. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Vázquez M. (21 de mayo de 2022). Ciudadanos de San Pedro expresan molestia por falta de agua. *El Siglo de Torreón*. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2022/ciudadanos-de-san-pedro-expresan-molestia-por-falta-de-agua.html>

La edición de esta obra estuvo a cargo de Arturo Juárez Martínez,  
Mary Carmen Paredes Díaz y Rafael Cruz Sánchez.

Se terminó de subir a la red en julio del 2024.

Se empleó tipografía Times New Roman,  
tamaño 9, 10, 11, 13, 18, 20 y 24 puntos.

Julio  
2024